


หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่

ชีววิทยา
เล่ม ๒

๔

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑



๙๒.-



หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์

ชีววิทยา

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

พิมพ์ครั้งที่ ๑

ISBN 978-616-362-700-1

จำนวน ๑๕๐,๐๐๐ เล่ม พ.ศ. ๒๕๖๑

จัดจำหน่ายโดย

องค์การค้าของ สกสค. พิมพ์ที่โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว

๒๒๔๙ ถนนลาดพร้าว วังทองหลาง กรุงเทพมหานคร



ประกาศสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน
เรื่อง อนุญาตให้ใช้สื่อการเรียนรู้ในสถานศึกษา

ด้วยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ ตามผลการเรียนรู้กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานได้พิจารณาแล้วอนุญาตให้ใช้ในสถานศึกษาได้

ประกาศ ณ วันที่ ๒๘ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๖๑

(นายบุญรักษ์ ยอดเพชร)
เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำนำ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) มีอำนาจหน้าที่ในการพัฒนาหลักสูตรวิธีการเรียนรู้ การประเมินผล การจัดทำหนังสือเรียน แบบฝึกหัด และสื่อการเรียนรู้ทุกประเภทที่ใช้ประกอบการเรียนรู้ในกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ของการจัดการศึกษาขั้นพื้นฐาน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ นี้ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) จัดทำขึ้นตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ เพื่อให้สถานศึกษาพิจารณาเทียบเคียงกับหลักสูตรสถานศึกษาและพิจารณาเลือกใช้หนังสือนี้ประกอบการจัดการเรียนรู้ให้สอดคล้องกับหลักสูตรสถานศึกษาของตนได้ตามความเหมาะสม

สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเรียนเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการเรียนรู้ในรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ และเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานการศึกษา กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีตลอดจนบุคคลและหน่วยงานอื่นๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำไว้ ณ โอกาสนี้

(นายบุญรักษ์ ยอดเพชร)
เลขาธิการคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อต้องการพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไปนี้โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับสำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ เล่ม ๒ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา เล่ม ๑ - เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ - ๖ แล้วก็สามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ชีวภาพได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา เล่ม ๒ นี้มีเนื้อหาที่จำเป็นที่ต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องโครโมโซมและสารพันธุกรรม การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ และวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญและเพียงพอสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบตรวจสอบความรู้ความเข้าใจก่อนเรียนมีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระคณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบัน และสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา เล่ม ๒ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จักขอบคุณยิ่ง

(นางพรพรรณ ไวทยางกูร)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญ และเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียนจะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

1 คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่ผู้เรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งผู้เรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว

2 จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งผู้เรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ

3 ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ชุดคำถามที่ใช้ในการตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน ซึ่งผู้เรียนควรตอบคำถามให้ถูกต้องทั้งหมด หากไม่ถูกต้องควรทบทวนเนื้อหานั้นก่อนเริ่มการเรียนรู้เรื่องใหม่ในแต่ละบท

4 ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่ หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้ผู้เรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา

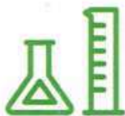
5 ตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง

6 ลองทำดู

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งผู้เรียนสามารถลงมือปฏิบัติด้วยตนเองนอกเวลาเรียนได้

7 กิจกรรม



การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งผู้เรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง

8 ตัวอย่าง



การแสดงแนวทางการตอบคำถามหรือการแก้โจทย์ปัญหา ซึ่งผู้เรียนสามารถศึกษาเพื่อให้มีความเข้าใจในเนื้อหาบทเรียนมากขึ้น

9 กิจกรรมเสนอแนะ



การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้

10 ความรู้เพิ่มเติม



ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น โดยไม่มีการวัดและประเมินผล

11 รู้หรือไม่



ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน

12 การเชื่อมโยงความรู้



เนื้อหาที่แสดงความเชื่อมโยงของความรู้ในบทเรียนกับความรู้ในวิชาวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ความรู้ในชีวิตประจำวัน หรือความรู้ที่ใช้ในอาชีพต่าง ๆ

13 กรณีศึกษา



ตัวอย่างข้อมูลจากการศึกษาหรืองานวิจัยที่สอดคล้องกับความรู้ในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนศึกษาวิเคราะห์จากกรณีจริง

14 สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน



การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

15 แบบฝึกหัดท้ายบท



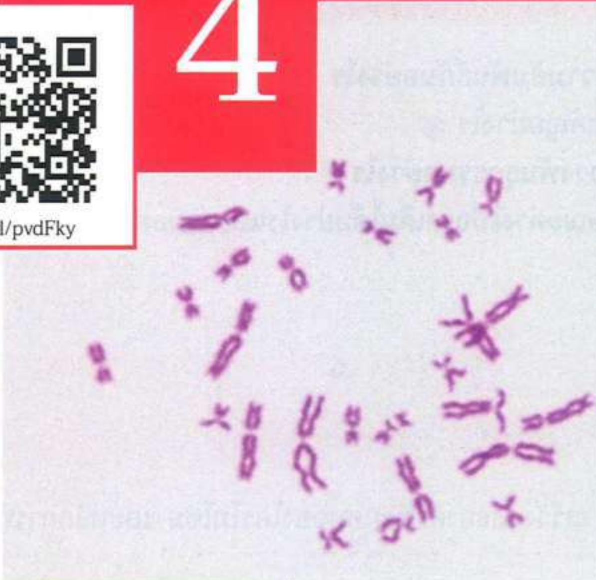
คำถามท้ายบทเรียนสำหรับให้ผู้เรียนตรวจสอบความเข้าใจหลังจากเรียนจบบทเรียนแล้ว ซึ่งผู้เรียนสามารถใช้เป็นข้อมูลในการทบทวนเนื้อหาที่ยังไม่เข้าใจได้

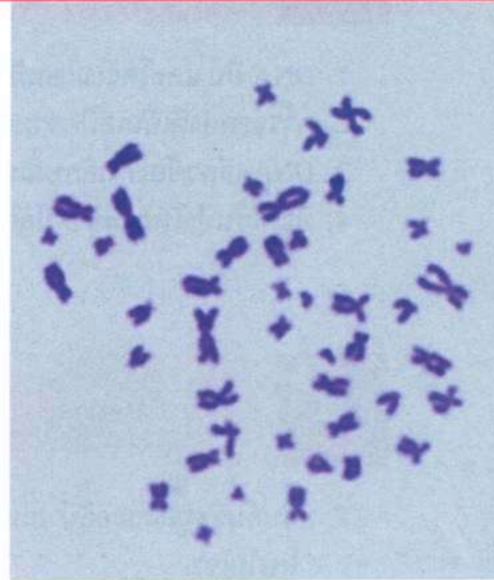
สารบัญ บทที่ 4 - 7

สารบัญ บทที่ 4 - 7

บทที่ 4 | โครโมโซมและสารพันธุกรรม


goo.gl/pvdFky


โครโมโซมของกบนา


โครโมโซมของมนุษย์

โครโมโซมของกบนา (*Hoplobatrachus rugulosus*) มีจำนวน 26 โครโมโซมซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่ละโครโมโซมประกอบด้วย 2 โครมาทิดเชื่อมติดกันที่ตำแหน่งเซนโทรเมียร์ เมื่อเทียบจำนวนโครโมโซมของกบนากับจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์อื่น เช่น มนุษย์มี 46 โครโมโซม พบว่ามีจำนวนโครโมโซมที่ต่างกัน **สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันจะมีจำนวนโครโมโซมต่างกันเสมอหรือไม่ และถ้าจัดเรียงโครโมโซมของกบนาหรือของมนุษย์โดยพิจารณาจากขนาดของโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ จะจัดเรียงได้อย่างไร**



คำถามสำคัญ

1. **DNA ยีน และโครโมโซมมีความสัมพันธ์กันอย่างไร**
2. **การจำลองดีเอ็นเอมีความสำคัญอย่างไร**
3. **DNA เกี่ยวข้องกับลักษณะทางพันธุกรรมอย่างไร**
4. **มิวเทชันทำให้สิ่งมีชีวิตมีลักษณะต่างไปจากเดิมได้อย่างไรและส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตอย่างไร**



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูลและอธิบายโครงสร้างและองค์ประกอบของโครโมโซม และหลักการจำแนกโครโมโซม
2. อภิปรายเกี่ยวกับการค้นพบสารพันธุกรรมโดยใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์
3. อธิบายโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA
4. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับ DNA แต่ละโมเลกุลมีจำนวนและลำดับนิวคลีโอไทด์แตกต่างกัน
5. อธิบายและสรุปความสัมพันธ์ในเชิงโครงสร้างระหว่างยีน DNA และโครโมโซม
6. อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม
7. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปกระบวนการจำลองดีเอ็นเอ
8. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
9. อธิบายหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน
10. เปรียบเทียบการสังเคราะห์โปรตีนของโพรแคริโอตและยูแคริโอต
11. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายสาเหตุและผลของการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม
12. ยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม



ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (√) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

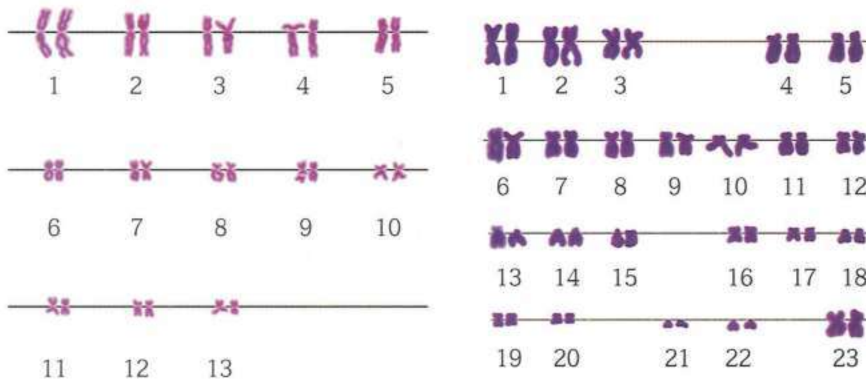
1. โครโมโซมของเซลล์ยูแคริโอตประกอบด้วย DNA และโปรตีน
2. ซิสเตอร์โครมาทิดยึดติดกันที่ตำแหน่งเซนโทรเมียร์
3. สิ่งมีชีวิตที่มีโครโมโซมของเซลล์ร่างกายมีลักษณะเหมือนกัน 2 ชุด เรียกว่า ดิพลอยด์
4. ฮอมอโลกัสโครโมโซมแยกออกจากกันในระยะแอนาเฟส II
5. กรดนิวคลิอิกทำหน้าที่เก็บและถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรม
6. นิวคลีโอไทด์ประกอบด้วย น้ำตาลเพนโทส ไนโตรจีนัสเบส และหมู่ฟอสเฟต
7. นิวคลีโอไทด์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์เป็นสายยาว เรียกว่า พอลินิวคลีโอไทด์
8. DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย
9. การเปลี่ยนแปลงของยีนหรือโครโมโซมไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต

4.1 โครโมโซม

จากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งเซลล์มาแล้วนั้น เซลล์ยูแคริโอตในระยะอินเตอร์เฟสจะเห็นโครมาทินอยู่ในนิวเคลียส เมื่อมีการแบ่งนิวเคลียสในระยะโพรเฟส โครมาทินจะมีการขดตัวทำให้หนาขึ้นและสั้นลง เรียกว่า โครโมโซม

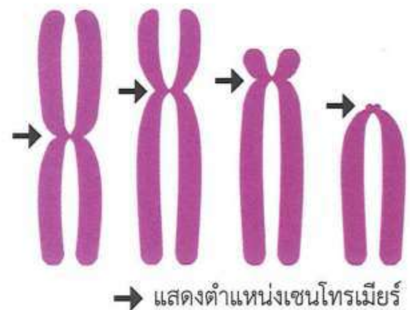
4.1.1 รูปร่าง ลักษณะ และจำนวนโครโมโซม

จากภาพนำบท เมื่อนำโครโมโซมมาจัดทำ**แคริโอไทป์** (karyotype) โดยจัดเรียงตามขนาดของโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ จะจัดเรียงโครโมโซมของกบนาได้ 13 คู่ และโครโมโซมของมนุษย์ได้ 23 คู่ จะสังเกตได้ว่า โครโมโซมมีรูปร่างลักษณะเหมือนกันเป็นคู่ เรียกโครโมโซมแต่ละคู่นี้ว่า **ฮอมอโลกัสโครโมโซม** (homologous chromosome) ดังรูป 4.1



รูป 4.1 แคริโอไทป์ของกบนาและมนุษย์

การจำแนกโครโมโซมสามารถจำแนกได้ตามขนาดของโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ เมื่อพิจารณาตำแหน่งเซนโทรเมียร์ ดังรูป 4.2 พบว่าสิ่งมีชีวิตสปีชีส์หนึ่งอาจมีโครโมโซมที่มีรูปร่างแบบเดียวหรือหลายแบบก็ได้



รูป 4.2 โครโมโซมแบบต่าง ๆ

สิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์จะมีโครโมโซมในเซลล์ร่างกายเหมือนกัน 2 ชุด (2n) โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีจำนวนโครโมโซมคงที่ ดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 จำนวนโครโมโซมในเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ

สัตว์	จำนวนโครโมโซม (2n)	พืช	จำนวนโครโมโซม (2n)
สุนัข (*Canis familiaris*)	78	ฝ้าย (*Gossypium hirsutum*)	52
ไก่ (*Gallus domesticus*)	78	ยาสูบ (*Nicotiana tabacum*)	48
ม้า (*Equus calibus*)	64	มันฝรั่ง (*Solanum tuberosum*)	48
ลา (*Equus asinus*)	62	สน (*Pinus ponderosa*)	24
มนุษย์ (*Homo sapiens*)	46	มะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*)	24
หนู (*Mus musculus*)	40	ข้าว (*Oryza sativa*)	24
แมว (*Felis domesticus*)	38	แตงโม (*Citrullus vulgalis*)	22
ผึ้ง (*Apis mellifera*)	32	ข้าวโพด (*Zea mays*)	20
กบ (*Rana pipiens*)	26	กะหล่ำปลี (*Brassica oleracea*)	18
แมลงวัน (*Musca domestica*)	12	มะละกอ (*Carica papaya*)	18
แมลงหวี่ (*Drosophila melanogaster*)	8	หอม (*Allium cepa*)	16
ยุงก้นปล่อง (*Anopheles dirus*)	6	ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*)	14

? นักวิทยาศาสตร์สามารถใช้จำนวนโครโมโซมในการระบุสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

? ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตในตาราง 4.1 มีจำนวนโครโมโซมที่เป็นเลขคู่เพราะเหตุใด

จากตาราง 4.1 จะเห็นว่า สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันอาจมีจำนวนโครโมโซมเท่ากันได้ จึงไม่สามารถใช้จำนวนโครโมโซมในการระบุสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตได้ อย่างไรก็ตามจำนวนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันจะมีจำนวนคงที่และเท่ากันเสมอ เมื่อศึกษาลักษณะของโครโมโซมของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์จะพบว่า มีโครโมโซมที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน



ความรู้เพิ่มเติม

แคริโอไทป์เป็นการศึกษาจำนวนและลักษณะรูปร่างของโครโมโซมในนิวเคลียสของเซลล์ยูแคริโอต แล้วนำมาจัดเรียงกันเป็นกลุ่มตามขนาดโครโมโซมและตำแหน่งของเซนโทรเมียร์ โดยนิยมใช้โครโมโซมในระยะเมทาเฟส เนื่องจากโครโมโซมมีการขดตัวจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นและสั้นลง จึงเป็นระยะที่มองเห็นโครโมโซมชัดที่สุด

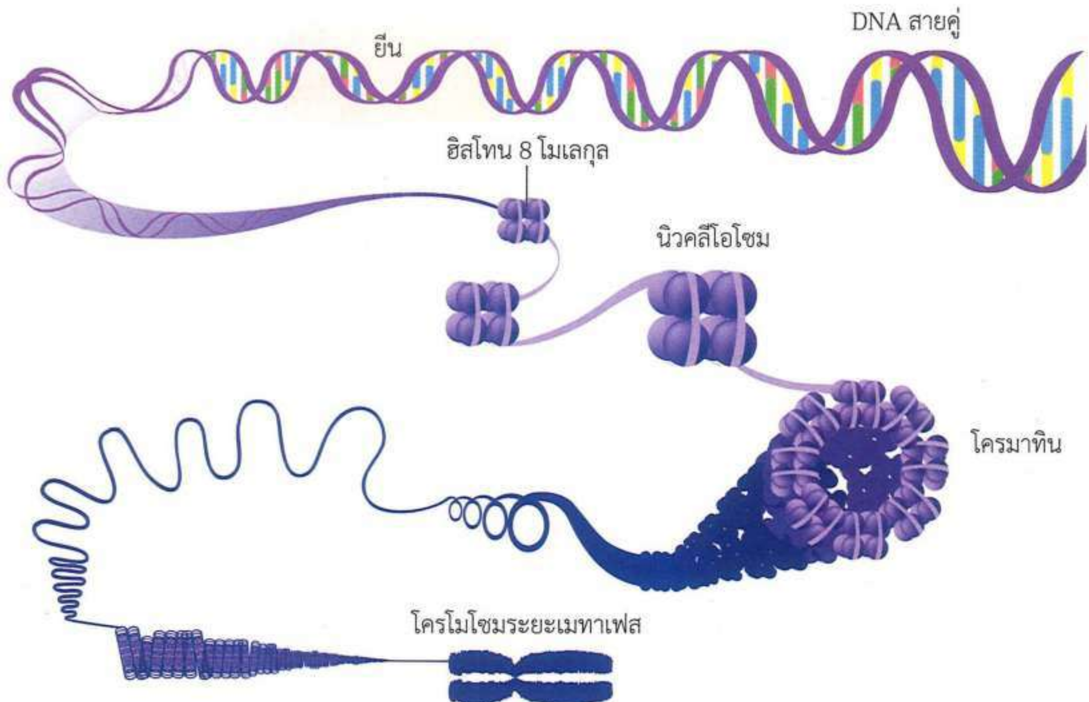
ในทางการแพทย์มีการใช้เซลล์ชนิดต่าง ๆ สำหรับวิเคราะห์โครโมโซม เพื่อวัตถุประสงค์ต่างกัน ดังนี้

- ลิมโฟไซต์ เพื่อศึกษาลักษณะ ขนาด และจำนวนของโครโมโซมเพื่อนำไปจัดเรียงแคริโอไทป์
- เซลล์ไขกระดูก เพื่อตรวจความผิดปกติของโครโมโซมในผู้ป่วยโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว
- เซลล์ของฟีตัสที่ปะปนในน้ำคร่ำ เพื่อศึกษาความผิดปกติทางพันธุกรรม

4.1.2 ส่วนประกอบของโครโมโซม

โครโมโซมของยูแคริโอตประกอบด้วย DNA ซึ่งนับเป็น 1 ใน 3 ส่วนของโครโมโซม และอีก 2 ใน 3 เป็นโปรตีนซึ่งส่วนใหญ่เป็น**ฮิสโทน** (histone) และบางส่วนเป็น**โปรตีนที่ไม่ใช่ฮิสโทน**หรือ**นอนฮิสโทนโปรตีน** (non-histone protein) จากการศึกษาพบว่าฮิสโทนเป็นโปรตีนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดแอมิโนที่มีประจุบวก เช่น ไลซีนและอาร์จีนีน ทำให้มีสมบัติในการจับกับ DNA ซึ่งมีประจุเป็นลบได้ดี

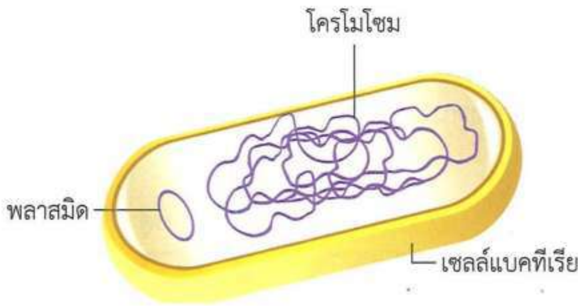
DNA ที่เป็นเส้น (linear DNA) สายคู่ 1 เส้นพันรอบกลุ่มฮิสโทน 8 โมเลกุล ทำให้มีรูปร่างคล้ายลูกปัด เรียกโครงสร้างนี้ว่า **นิวคลีโอโซม** (nucleosome) และนิวคลีโอโซมม้วนพันกันเป็นโครมาทิน โครมาทินในระยะที่มีการแบ่งนิวเคลียสจะมีการขดตัวทำให้หนาขึ้นและสั้นลงมองเห็นเป็นโครโมโซม ดังรูป 4.3



รูป 4.3 ส่วนประกอบโครโมโซมของยูแคริโอต

สาย DNA บางช่วงทำหน้าที่กำหนดลักษณะทางพันธุกรรม ซึ่งเรียก DNA ช่วงนั้นว่า **ยีน** (gene) ในเซลล์ยูแคริโอตนอกจากพบ DNA ในนิวเคลียสแล้ว ยังพบ DNA ในไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์อีกด้วย

โครโมโซมของเซลล์โพรแคริโอต เช่น แบคทีเรีย มีจำนวนโครโมโซมชุดเดียว และมีโครโมโซมเป็นวงอยู่ในไซโทพลาซึม โครโมโซมของแบคทีเรียประกอบด้วย DNA สายคู่ที่เป็นวง 1 โมเลกุล และไม่มีฮิสโทนเป็นองค์ประกอบ แต่มีโปรตีนชนิดอื่นที่คล้ายฮิสโทนช่วยในการขดตัวแน่น นอกจากนี้ในแบคทีเรียบางชนิดยังมี**พลาสมิด** (plasmid) ซึ่งเป็น DNA สายคู่ที่เป็นวงขนาดเล็กอยู่นอกโครโมโซมของแบคทีเรียอีกด้วย ดังรูป 4.4



รูป 4.4 โครโมโซมและพลาสมิดภายในเซลล์แบคทีเรีย



รู้หรือไม่

แต่เดิมจีโนมหมายถึง ข้อมูลทางพันธุกรรมทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่ง โดยใช้กับไวรัสและโพรแคริโอต ส่วนในยูแคริโอตนั้น จีโนมหมายถึงข้อมูลทางพันธุกรรมของเซลล์แฮพลอยด์ แต่ในปัจจุบัน จีโนมอาจหมายถึงสารพันธุกรรมทั้งหมดภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งประกอบด้วยสารพันธุกรรมในนิวเคลียส ไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์

สารพันธุกรรมทั้งหมดของโครโมโซม 1 ชุด ของสิ่งมีชีวิตหนึ่ง ๆ เรียกว่า **จีโนม** (genome) จากการศึกษาสิ่งมีชีวิตบางสปีชีส์พบว่า สิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีขนาดของจีโนม จำนวนโครโมโซม และจำนวนยีนแตกต่างกัน ดังตาราง 4.2 มีการศึกษาจีโนมเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของยีน ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน และหน้าที่ของยีนเพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ

ตาราง 4.2 ขนาดของจีโนม จำนวนโครโมโซม และจำนวนยีนของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ

สิ่งมีชีวิต	ขนาดของจีโนมโดยประมาณ (ล้านคู่เบส)	จำนวนโครโมโซม	จำนวนยีนโดยประมาณ
มนุษย์ (*Homo sapiens*)	3,000	46	25,000
หนู (*Mus musculus*)	2,900	40	25,000
ข้าว (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*)	389	24	37,000
อะราบิดอพซิส (*Arabidopsis thaliana*)	135	10	25,000
ยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*)	12	32	6,000
แบคทีเรีย (*Escherichia coli*)	4.6	1	3,200

 ยูแคริโอตเซลล์เดียวและหลายเซลล์มีขนาดของจีโนมและจำนวนยีนที่แตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร

 เพราะเหตุใดมนุษย์จึงมีจำนวนยีนมากกว่ายีสต์และแบคทีเรีย



ความรู้เพิ่มเติม



Arabidopsis thaliana เป็นพืชต้นแบบในการศึกษาพันธุกรรมพืช เนื่องจากมีลักษณะเหมาะสมในการศึกษา คือ เป็นพืชดอกขนาดเล็ก เจริญเติบโตเร็ว วัฏจักรชีวิตสั้น จีโนมมีขนาดเล็กประมาณ 135 ล้านคู่เบส และทราบลำดับนิวคลีโอไทด์ของจีโนมแล้ว

4.2 สารพันธุกรรม

4.2.1 การค้นพบสารพันธุกรรม

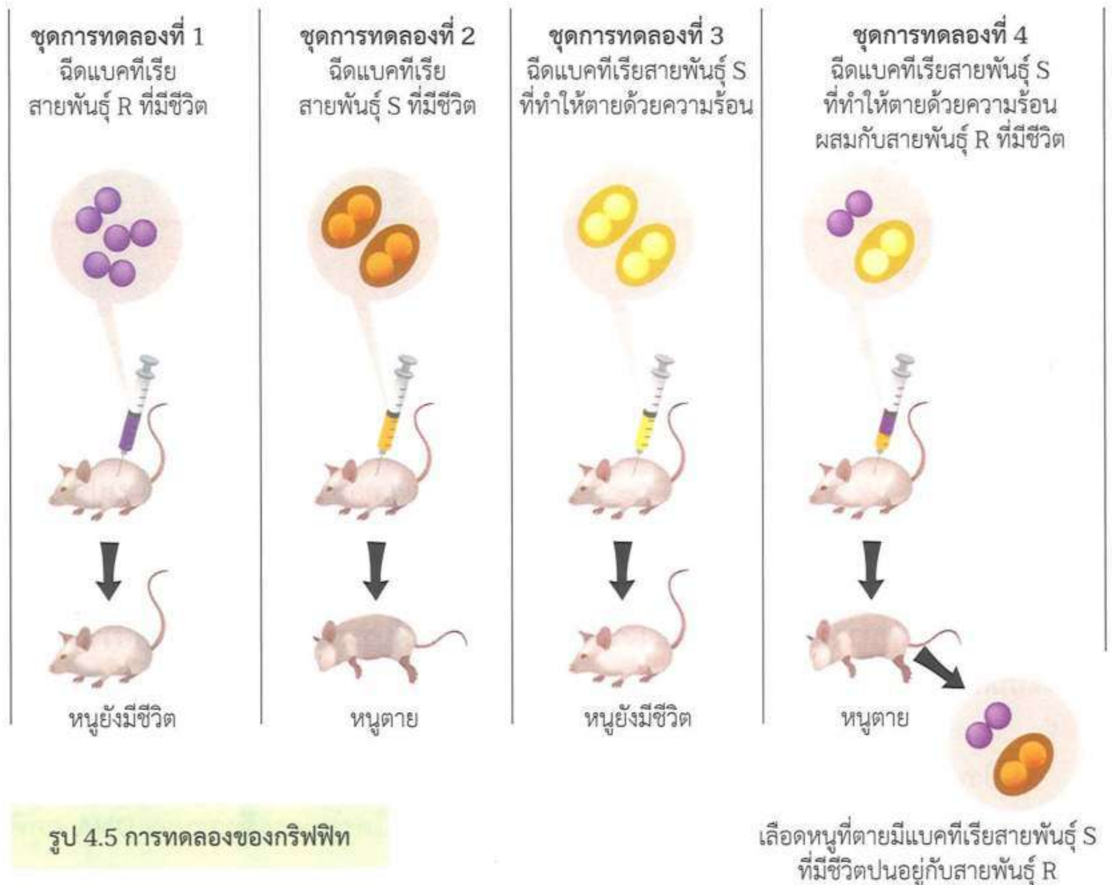
นักวิทยาศาสตร์ได้ใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ศึกษาเกี่ยวกับสารพันธุกรรม ดังนี้

ในปี พ.ศ. 2412 ฟรีดริช มีเชอร์ (Friedrich Miescher) แพทย์ชาวสวิส ได้ศึกษาส่วนประกอบในนิวเคลียสของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ติดมากับผ้าพันแผล โดยนำมาย่อยเอาโปรตีนออกด้วยเอนไซม์เพปซิน พบว่าเอนไซม์นี้ไม่สามารถย่อยสลายสารชนิดหนึ่งที่อยู่ภายในนิวเคลียสได้ เมื่อนำสารนี้มาวิเคราะห์ทางเคมีก็พบว่า มีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ ต่อมามีผู้ค้นพบว่าสารนี้มีสมบัติเป็นกรดจึงเรียกว่า กรดนิวคลิอิก

ในปี พ.ศ. 2457 มีการพัฒนาสี**ฟุคซิน** (fuchsin) ที่สามารถย้อมติด DNA ได้เป็นสีแดง และเมื่อนำไปย้อมเซลล์ พบว่าสีจะติดที่นิวเคลียสและรวมตัวหนาแน่นที่โครโมโซม จึงสรุปว่า DNA อยู่ที่โครโมโซม

การค้นพบว่า DNA อยู่ที่โครโมโซม ทำให้นักวิทยาศาสตร์คิดว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ อย่างไรก็ตามยังมีนักวิทยาศาสตร์ที่คิดว่า โปรตีนน่าจะเป็นสารพันธุกรรม เนื่องจากโปรตีนประกอบด้วยกรดแอมิโน 20 ชนิด การเรียงลำดับกรดแอมิโนแบบต่าง ๆ น่าจะทำให้มีโปรตีนชนิดต่าง ๆ มากพอที่จะควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิตอย่างครบถ้วน **นักวิทยาศาสตร์พิสูจน์ได้อย่างไรว่า DNA หรือโปรตีนเป็นสารพันธุกรรมที่ควบคุมลักษณะของสิ่งมีชีวิต**

ในปี พ.ศ. 2471 เฟรเดอริก กริฟฟิท (Frederick Griffith) แพทย์ชาวอังกฤษ ทำการทดลองโดยฉีดแบคทีเรีย *Streptococcus pneumoniae* ที่ทำให้เกิดโรคปอดบวมเข้าไปในหนู แบคทีเรียที่ฉีดเข้าไปนี้มี 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ R เป็นสายพันธุ์ที่มี**ผิวขรุขระ** (rough) เพราะไม่มี**แคปซูล** (capsule) ห่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ไม่ทำให้เกิดโรคปอดบวม กับสายพันธุ์ S เป็นสายพันธุ์ที่มี**ผิวเรียบ** (smooth) เพราะมีแคปซูลห่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ทำให้เกิดโรคปอดบวมรุนแรงทำให้หนูตายได้ ดังรูป 4.5



รูป 4.5 การทดลองของกริฟฟิท

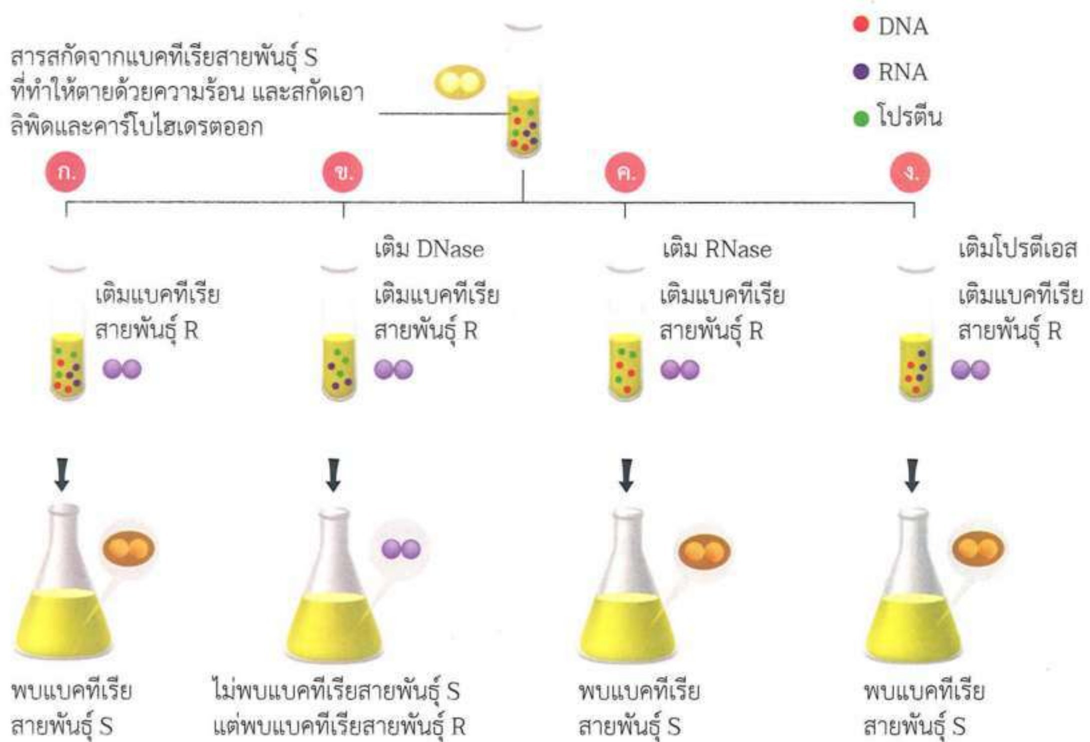
? ถ้าทำการทดลองเฉพาะชุดการทดลองที่ 3 และ 4 โดยที่ไม่มีชุดการทดลองที่ 1 และ 2 จะสามารถสรุปผลได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

? ถ้านำเลือดของหนูจากชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มาตรวจ จะพบแบคทีเรียหรือไม่ อย่างไร

? ในชุดการทดลองที่ 4 พบทั้งแบคทีเรียสายพันธุ์ S และสายพันธุ์ R ในเลือดของหนูที่ตาย แบคทีเรียสายพันธุ์ใดที่ทำให้หนูตาย เพราะเหตุใด

กริฟฟิทได้รายงานว่า มีสารบางอย่างจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่ทำให้ตายด้วยความร้อน ได้เข้าไปยังแบคทีเรียสายพันธุ์ R บางเซลล์และทำให้แบคทีเรียสายพันธุ์ R เปลี่ยนแปลงเป็นสายพันธุ์ S ที่มีชีวิต สายพันธุ์ S เหล่านี้ยังสามารถถ่ายทอดลักษณะไปสู่รุ่นลูกหลานได้ อย่างไรก็ตามกริฟฟิทยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าสารนั้นคืออะไร

ในปี พ.ศ. 2487 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน 3 คน คือ ออสวอลด์ แอเวอรี (Oswald Avery) คอลิน แมคลอยด์ (Colin MacLeod) และแมคลิน แมคคาร์ที (Maclyn McCarty) ทำการทดลองต่อจากกริฟฟิท เพื่อตรวจสอบว่า DNA RNA หรือโปรตีนเป็นสารที่เปลี่ยนพันธุกรรมของแบคทีเรียจากสายพันธุ์ R ให้เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ S โดยนำแบคทีเรียสายพันธุ์ S มาทำให้ตายด้วยความร้อน แล้วสกัดเอาลิพิดและคาร์โบไฮเดรตออก จากนั้นนำสารสกัดส่วนที่เหลือใส่ในหลอดทดลอง 4 หลอด เติมแบคทีเรียและเอนไซม์ DNase เพื่อย่อย DNA เติมเอนไซม์ RNase เพื่อย่อย RNA หรือเติมเอนไซม์ **โปรตีเอส** (protease) เพื่อย่อยโปรตีน ดังการทดลองในรูป 4.6 ปล่อยไว้ระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อตรวจสอบแบคทีเรียที่เกิดขึ้น



รูป 4.6 การทดลองของแอเวอรี แมคลอยด์ และแมคคาร์ที

? ถ้าเพิ่มชุดการทดลอง จ. ที่เติมเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด คือ DNase RNase และโปรตีเอสลงในหลอดทดลองที่มีแบคทีเรียสายพันธุ์ R แล้วนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อตรวจสอบจะพบแบคทีเรียสายพันธุ์ใด เพราะเหตุใด

จากผลการทดลองของแอเวอรีและคณะ ปรากฏว่าในชุดการทดลอง ก. ซึ่งเป็นชุดควบคุมที่มีส่วนผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ R กับสารสกัดจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่ทำให้ตายด้วยความร้อน พบแบคทีเรียสายพันธุ์ S แต่ชุดการทดลอง ข. ในภาวะที่มีเอนไซม์ DNase จะไม่พบแบคทีเรียสายพันธุ์ S ที่เกิดขึ้นใหม่ ในขณะที่ในส่วนผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ R กับสารสกัดจากแบคทีเรียสายพันธุ์ S ของชุดการทดลอง ค. ในภาวะที่มีเอนไซม์ RNase และชุดการทดลอง ง. ในภาวะที่มีเอนไซม์โปรตีเอสจะพบแบคทีเรียสายพันธุ์ S เกิดขึ้น การทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า DNA คือสารที่เปลี่ยนพันธุกรรมของแบคทีเรียจากสายพันธุ์ R ให้เป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ S แอเวอรีและคณะจึงสรุปว่ากรดนิวคลิอิกชนิด DNA เป็นสารพันธุกรรม ไม่ใช่โปรตีนดังที่เคยเชื่อกันมาก่อนหน้านี้

นอกจากนี้ยังมีการทดลองอื่น ๆ ที่ตามมา ซึ่งยืนยันตรงกันว่า DNA เป็นสารพันธุกรรม และต่อมาได้มีการค้นพบว่า DNA เป็นสารพันธุกรรมของไวรัสและสิ่งมีชีวิตทั่วไปทั้งแบคทีเรีย โพรทิสต์ พืช สัตว์ และมนุษย์ อย่างไรก็ตามไวรัสบางชนิดมี RNA เป็นสารพันธุกรรม เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคใบด่างในใบยาสูบ ไวรัสที่เป็นสาเหตุของโรคโปลิโอ เอดส์ ซาร์ส ไข้หวัดนก และโรคมะเร็งบางชนิด

ดังนั้นจึงถือได้ว่าผลการทดลองของกริฟฟิทกับผลการทดลองของแอเวอรีและคณะเป็นจุดเริ่มต้นที่นำไปสู่ข้อสรุปที่สำคัญ คือ DNA เป็นสารพันธุกรรมที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดลักษณะของสิ่งมีชีวิตไปสู่รุ่นต่อ ๆ ไปนั้น และจากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ในระยะต่อมาพบว่า DNA มีทั้งส่วนที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม เรียกว่า ยีน และส่วนที่ไม่ได้ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม



ชวนคิด

DNA ส่วนที่ไม่ใช่ยีน ทำหน้าที่อะไรบ้าง และมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์จาก DNA ส่วนนี้ได้หรือไม่ อย่างไร



การเชื่อมโยงความรู้

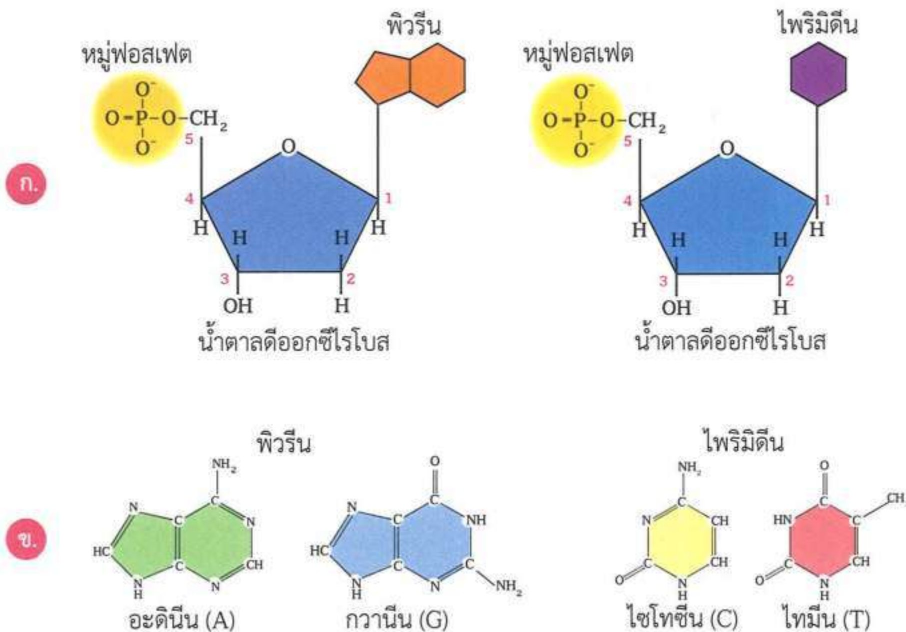
หนังสือเรียนชีววิทยา เล่ม 1 เรื่อง กรดนิวคลิอิก

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของ DNA

DNA เป็นกรดนิวคลิอิกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็น**พอลิเมอร์** (polymer) สายยาวประกอบด้วยหน่วยย่อยหรือ**มอโนเมอร์** (monomer) ที่เรียกว่า **นิวคลีโอไทด์** (nucleotide)

นิวคลีโอไทด์ ประกอบด้วยส่วนย่อย 3 ส่วน ได้แก่ น้ำตาลดีออกซีไรโบส ไนโตรจีนัสเบส และหมู่ฟอสเฟต ซึ่งทั้ง 3 ส่วนจะประกอบกันโดยมีน้ำตาลดีออกซีไรโบสเป็นแกนหลัก มีไนโตรจีนัสเบสต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และหมู่ฟอสเฟตต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ไนโตรจีนัสเบสใน DNA แบ่งนิวคลีโอไทด์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

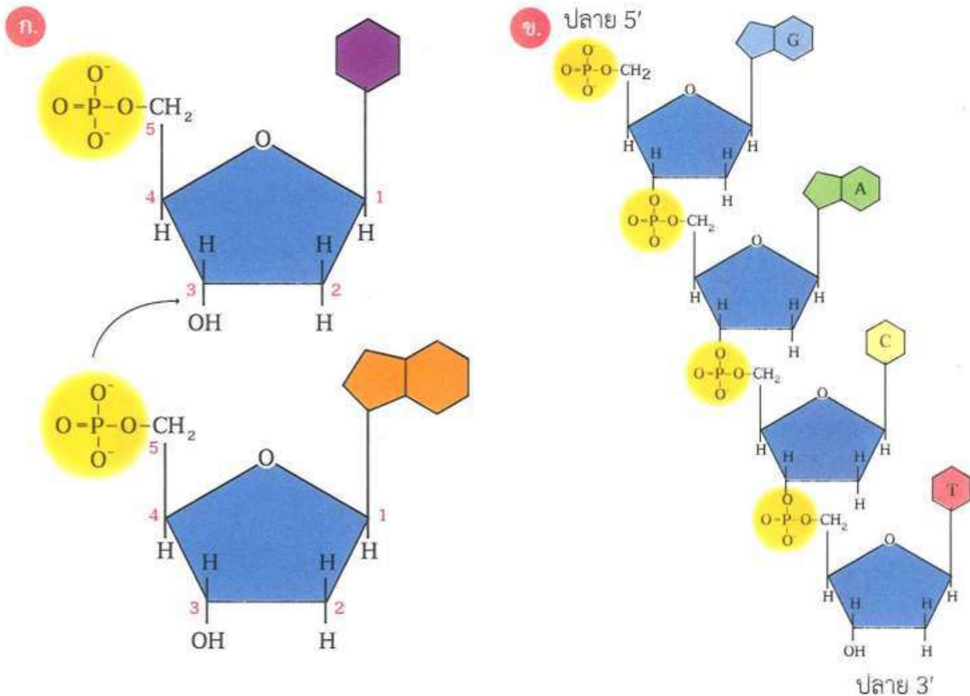
- **พิวรีน** (purine) มีโครงสร้างเป็นวงต่อกัน 2 วง พิวรีน มี 2 ชนิด คือ อะดีนีน (A) กวานีน (G)
- **ไพริมิดีน** (pyrimidine) มีโครงสร้างเป็นวง 1 วง ไพริมิดีนมี 2 ชนิด คือ ไซโทซีน (C) และไทมีน (T) ดังรูป 4.7



รูป 4.7 นิวคลีโอไทด์
ก. โครงสร้าง ข. ไนโตรจีนัสเบส

? นิวคลีโอไทด์แต่ละชนิดเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

นิวคลีโอไทด์เชื่อมต่อกันด้วย**พันธะฟอสโฟไดเอสเตอร์** (phosphodiester bond) ระหว่างหมู่ฟอสเฟตซึ่งอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ของน้ำตาลในนิวคลีโอไทด์หนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของน้ำตาลในอีกนิวคลีโอไทด์หนึ่ง ดังรูป 4.8 ก. เมื่อนิวคลีโอไทด์หลายโมเลกุลมาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นสายพอลินิวคลีโอไทด์ ดังรูป 4.8 ข.



รูป 4.8 พอลินิวคลีโอไทด์
ก. การเชื่อมต่อระหว่างนิวคลีโอไทด์
ข. สายพอลินิวคลีโอไทด์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างนิวคลีโอไทด์

จากรูปจะเห็นว่าที่ปลายด้านหนึ่งของสายพอลินิวคลีโอไทด์มีหมู่ฟอสเฟตอิสระต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ของน้ำตาลดีออกซีไรโบส เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 5′ และอีกปลายด้านหนึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของน้ำตาลดีออกซีไรโบส เรียกปลายด้านนี้ว่า ปลาย 3′

ปี พ.ศ. 2492 เออร์วิน ชาร์กาฟฟ์ (Erwin Chargaff) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน ได้วิเคราะห์ปริมาณเบสที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุล DNA ในสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ พบว่า DNA ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ มีอัตราส่วนของเบส 4 ชนิดแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเบสในโมเลกุล DNA ในเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ

สิ่งมีชีวิต	ชนิดของเบส (ร้อยละ)				อัตราส่วน	
	อะดีนีน (A)	ไทมีน (T)	กวานีน (G)	ไซโทซีน (C)	A : T	G : C
ยีสต์	31.3	32.9	18.7	17.1	0.95	1.09
เม่นทะเล	32.8	32.1	17.7	18.4	1.02	1.02
ปลาแซลมอน	29.7	29.1	20.8	20.4	1.02	1.02
หนู	28.6	28.4	21.4	21.5	1.01	1.00
มนุษย์ (ไทมัส)	29.3	30.0	20.7	20.0	0.98	1.04

? ปริมาณเบส 4 ชนิด ใน DNA ของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ สัมพันธ์กันอย่างไร

? อัตราส่วนของ A + T และ G + C ในโมเลกุลของ DNA ของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์ มีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่

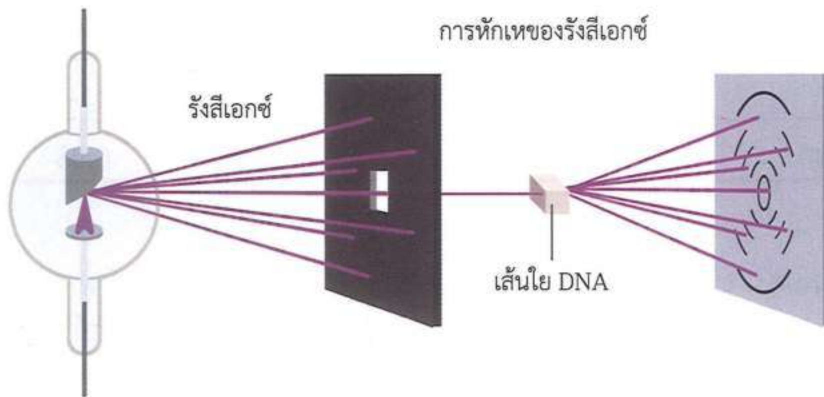
? อัตราส่วนของ A + G และ T + C ในโมเลกุลของ DNA ของสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์ มีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของชาร์กาฟฟ์แสดงให้เห็นว่า ในสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์จะมีปริมาณของเบส 4 ชนิดแตกต่างกัน แต่มีปริมาณของ A ใกล้เคียงกับ T และปริมาณของ G ใกล้เคียงกับ C เสมอ โดยสิ่งมีชีวิตจะมีอัตราส่วนระหว่าง A : T และ G : C ใกล้เคียงกับ 1 จากอัตราส่วนดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า DNA จะต้องมีการจัดเรียงตัวของนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ที่ทำให้จำนวนของ A เท่ากับ T และ G เท่ากับ C

4.2.3 โครงสร้างของ DNA

ปี พ.ศ. 2494-2495 มอริซ วิลคินส์ (Maurice Wilkins) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ศึกษาโครงสร้างของ DNA ของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค**เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน** (X-ray diffraction) ด้วยการฉายรังสีเอกซ์ผ่านเส้นใย DNA การหักเหของรังสีเอกซ์ทำให้เกิดภาพบนแผ่นฟิล์ม

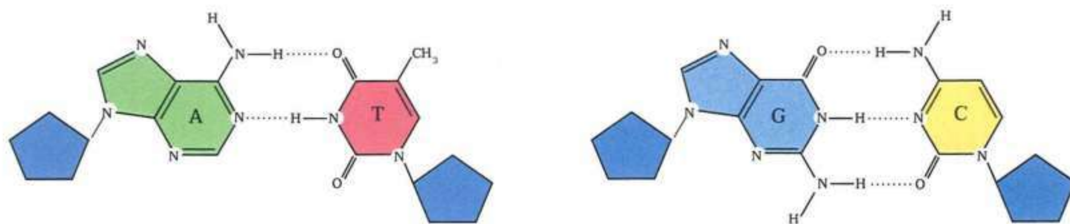
ปี พ.ศ. 2495 โรซาลินด์ แฟรงคลิน (Rosalind Franklin) นักเคมีชาวอังกฤษ และเรย์มอนด์ กอสลิง (Raymond Gosling) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และได้ภาพถ่ายที่ชัดเจน ดังรูป 4.9 ซึ่งภาพถ่ายนี้แสดงว่า DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย มีลักษณะเป็นเกลียว โดยเกลียวแต่ละรอบมีระยะห่างเท่า ๆ กัน รวมทั้งทำให้ทราบขนาดความกว้างและความห่างของเกลียวแต่ละรอบ จากผลการศึกษานี้ทำให้มีความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างทางกายภาพของ DNA ที่ชัดเจนขึ้น



รูป 4.9 ภาพบนแผ่นฟิล์มที่เกิดจากการหักเหของรังสีเอกซ์ผ่านเส้นใย DNA

ในปี พ.ศ. 2496 เจมส์ วอตสัน (James Watson) นักชีวเคมีชาวอเมริกัน และฟรานซิส คริก (Francis Crick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของ DNA โดยใช้ความรู้จากข้อมูลปริมาณเบสที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุล DNA และภาพจากเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของเส้นใย DNA

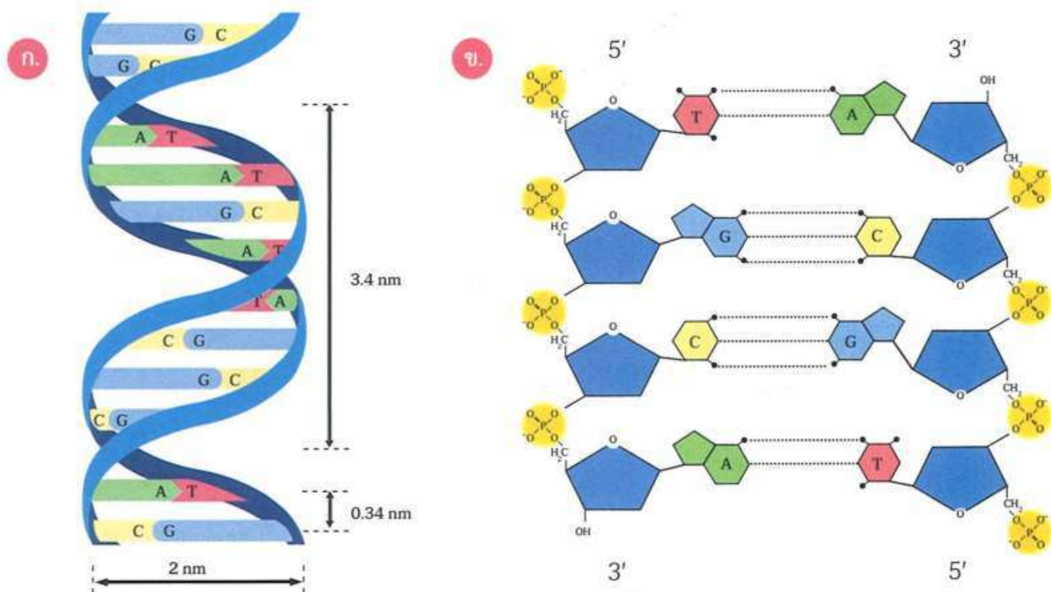
DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย ซึ่งติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างเบสจากพอลินิวคลีโอไทด์สายหนึ่งกับเบสจากพอลินิวคลีโอไทด์อีกสายหนึ่ง โดย A คู่กับ T และ C คู่กับ G เสมอ เรียกว่า **เบสคู่สม** (complementary base pair) ดังรูป 4.10



รูป 4.10 A สร้างพันธะไฮโดรเจน 2 พันธะกับ T และ G สร้างพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะกับ C

? แรงยึดระหว่างคู่เบส A กับ T และคู่เบส G และ C คู่ใดมีความแข็งแรงมากกว่ากัน เพราะเหตุใด

DNA มีโครงสร้างเป็น**เกลียวคู่** (double helix) มีทิศทางเวียนขวาลักษณะคล้ายบันไดเวียน โดยมีน้ำตาลดีออกซีไรโบสจับกับหมู่ฟอสเฟตเป็นราวบันได และบันไดแต่ละขั้นคือ เบส 1 คู่เบส โดยโครงสร้างเกลียวคู่มีความกว้าง 2 nm เกลียวแต่ละรอบห่างกัน 3.4 nm และแต่ละคู่เบสมีระยะห่างกัน 0.34 nm โดยใน 1 เกลียวของ DNA ประกอบด้วยคู่เบส 10 คู่ ดังรูป 4.11 ก. โดยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายที่มาเข้าคู่กันนั้น จะมี**ทิศทางตรงกันข้าม** (antiparallel) ดังรูป 4.11 ข.



รูป 4.11 โครงสร้างของ DNA
ก. โครงสร้างเกลียวคู่ของ DNA
ข. องค์ประกอบทางเคมีของ DNA



กิจกรรม 4.1 แบบจำลอง DNA

จุดประสงค์

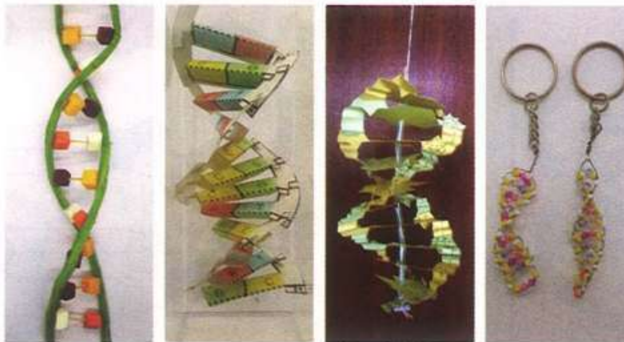
1. สร้างแบบจำลอง DNA จากวัสดุต่าง ๆ
2. เปรียบเทียบจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสจากแบบจำลอง DNA

วัสดุและอุปกรณ์

กระดาษ ลูกปัด ผัก ผลไม้ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น

วิธีการทำกิจกรรม

1. กำหนดความยาวของ DNA ที่มี 15-20 นิวคลีโอไทด์ และกำหนดชนิดของเบสที่เป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์
2. สร้างแบบจำลอง DNA ที่สอดคล้องกับจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสที่กำหนดไว้จากข้อ 1 โดยใช้วัสดุต่าง ๆ เช่น กระดาษ ลูกปัด ผัก ผลไม้ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น
3. นำเสนอผลงานและเปรียบเทียบจำนวนนิวคลีโอไทด์และชนิดของเบสที่เหมือนหรือแตกต่างกันของแต่ละกลุ่ม



คำถามท้ายกิจกรรม

? แบบจำลอง DNA ของแต่ละกลุ่มมีจำนวนนิวคลีโอไทด์เท่ากันหรือแตกต่างกันอย่างไร และถ้ามีจำนวนนิวคลีโอไทด์เท่ากัน การจัดเรียงตัวของเบสในแต่ละพอลินิวคลีโอไทด์ใน DNA จะเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร

? ถ้า DNA สายเดี่ยวประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 2 โมเลกุลเรียงต่อกัน จะสามารถจัดเรียงเบสให้แตกต่างกันได้อย่างไรบ้าง

ลำดับนิวคลีโอไทด์ของ DNA ที่เกิดจากเบส 4 ชนิดเรียงต่อกันก็มีหลายรูปแบบ เช่น ถ้า DNA ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 2 โมเลกุลเรียงต่อกัน จะสามารถจัดเรียงให้แตกต่างกันได้ 16 แบบ (4^2) ดังนั้นถ้า DNA ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์จำนวนมาก ก็จะมีรูปแบบของการเรียงลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ ขนาดของจีโนมในสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์อาจประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์นับล้านคู่จึงทำให้มีรูปแบบของ DNA ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งน่าจะมากพอที่จะทำหน้าที่ควบคุมหรือกำหนดลักษณะพันธุกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตได้ **DNA กำหนดและควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมได้อย่างไร**

4.3 สมบัติของสารพันธุกรรม

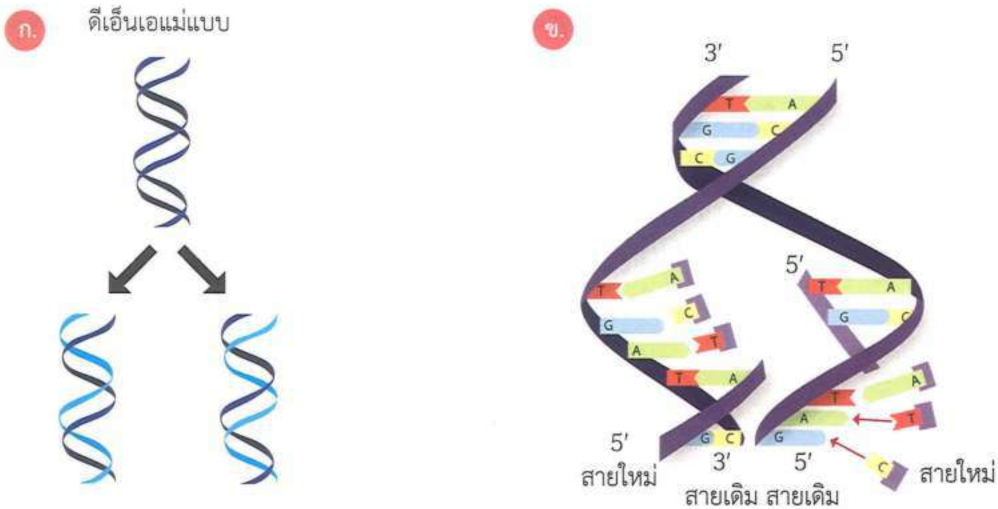
สารพันธุกรรมมีสมบัติสำคัญคือ สามารถเพิ่มจำนวนได้โดยมีลักษณะเหมือนเดิม สามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้ สามารถควบคุมให้เซลล์สังเคราะห์สารต่าง ๆ เพื่อแสดงลักษณะทางพันธุกรรมให้ปรากฏ และอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างไปจากเดิม และเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่

4.3.1 การจำลองดีเอ็นเอ

ก่อนที่เซลล์จะมีการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสหรือไมโอซิส จะมีการจำลอง DNA เกิดขึ้นในระยะ S ของระยะอินเตอร์เฟสซึ่งเป็นระยะที่เซลล์มีการสังเคราะห์ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นอีกชุดหนึ่ง

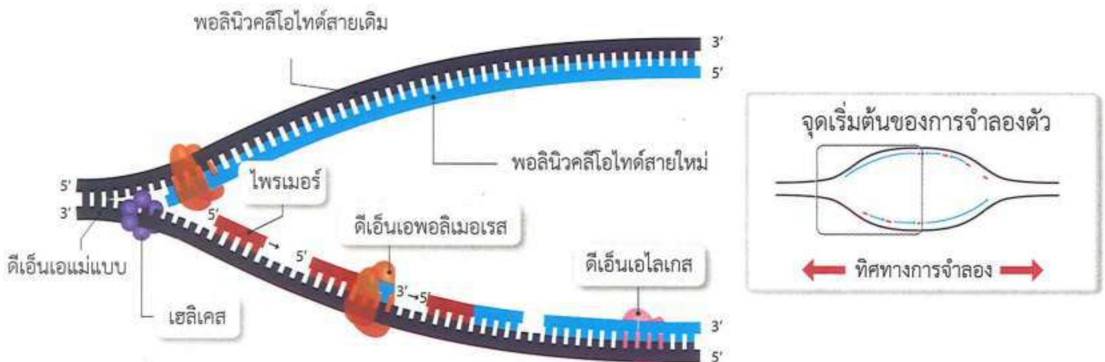
ในปี พ.ศ. 2496 วอตสันและคริกได้ตีพิมพ์บทความเรื่องโครงสร้าง DNA และเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับ **การจำลองดีเอ็นเอ** (DNA replication) ต่อมาเมื่อมีการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ในการจำลองดีเอ็นเอเริ่มจากพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายแยกออกจากกัน โดยพอลินิวคลีโอไทด์แต่ละสายทำหน้าที่เป็น **ดีเอ็นเอแม่แบบ** (DNA template) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจำลองดีเอ็นเอจะมีการเพิ่มโมเลกุลของ DNA จาก 1 โมเลกุล เป็น 2 โมเลกุล แต่ละโมเลกุลมีพอลินิวคลีโอไทด์สายเดิม 1 สาย และสายใหม่ 1 สาย เรียกวิธีการนี้ว่า **การจำลองแบบกึ่งอนุรักษ์** (semiconservative replication) ดังรูป 4.12 ก.

โดยในการสร้าง DNA สายใหม่ มีการนำนิวคลีโอไทด์อิสระเข้ามาต่อทางปลาย 3′ ของ DNA ที่กำลังสร้างอยู่ จึงเรียกว่าเป็นการสร้าง DNA ในทิศทางจากปลาย 5′ ไปปลาย 3′ และนิวคลีโอไทด์ที่เข้ามาใหม่นั้นจะมีเบสคู่สมกับเบสในสายดีเอ็นเอแม่แบบ ดังรูป 4.12 ข. ทำให้ DNA ที่สังเคราะห์ใหม่เหมือนกับ DNA โมเลกุลเดิม



รูป 4.12 การจำลองดีเอ็นเอ
ก. การจำลองแบบกึ่งอนุรักษ์
ข. นิวคลีโอไทด์เข้าต่อทางด้านปลาย 3′ ของสายพอลินิวคลีโอไทด์ที่กำลังสร้าง

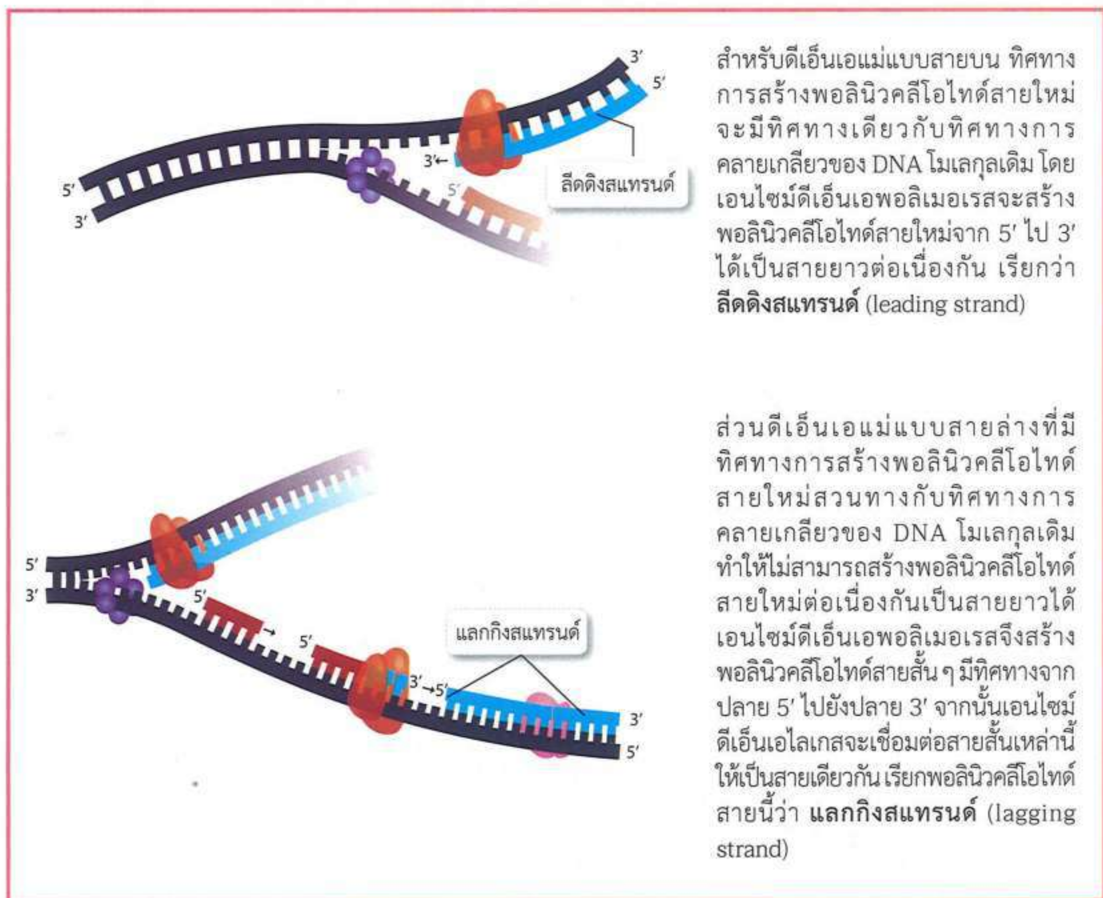
ในขั้นตอนการจำลองดีเอ็นเอ จะมีโปรตีนมากระตุ้นให้ DNA คลายตัวที่ตำแหน่ง**จุดเริ่มต้นของการจำลองตัว** (origin of replication) ซึ่งการจำลองดีเอ็นเอจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทาง **เอนไซม์เฮลิเคส** (helicase) สลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างคู่เบส ทำให้พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายแยกออกจากกัน พอลินิวคลีโอไทด์แต่ละสายทำหน้าที่เป็นแม่แบบสำหรับการสังเคราะห์ DNA โดยมีไพรเมอร์มาเกาะในตำแหน่งที่เป็นเบสคู่สมเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างพอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่ และ**เอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส** (DNA ligase) ทำหน้าที่เชื่อมต่อพอลินิวคลีโอไทด์สายสั้น ๆ ดังรูป 4.13



รูป 4.13 การจำลองดีเอ็นเอ

การสังเคราะห์พอลินิวคลีโอไทด์สายใหม่จะสร้างในทิศทางจากปลาย 5′ ไปยังปลาย 3′ เสมอ **กระบวนการสังเคราะห์ DNA สายใหม่ทั้งสองสายเหมือนกันหรือไม่ อย่างไร**

จากรูป 4.13 จะเห็นว่า ดีเอ็นเอแม่แบบสายบนมีปลาย 5′ อยู่ทางซ้าย และปลาย 3′ อยู่ทางขวา ส่วนอีกสายหนึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน แต่พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย มีทิศทางการคลายเกลียวและแยกออกจากกันไปในทิศทางด้านซ้าย การสังเคราะห์ DNA สายใหม่ทั้ง 2 สาย จึงมีส่วนที่แตกต่างกัน ดังรูป 4.14

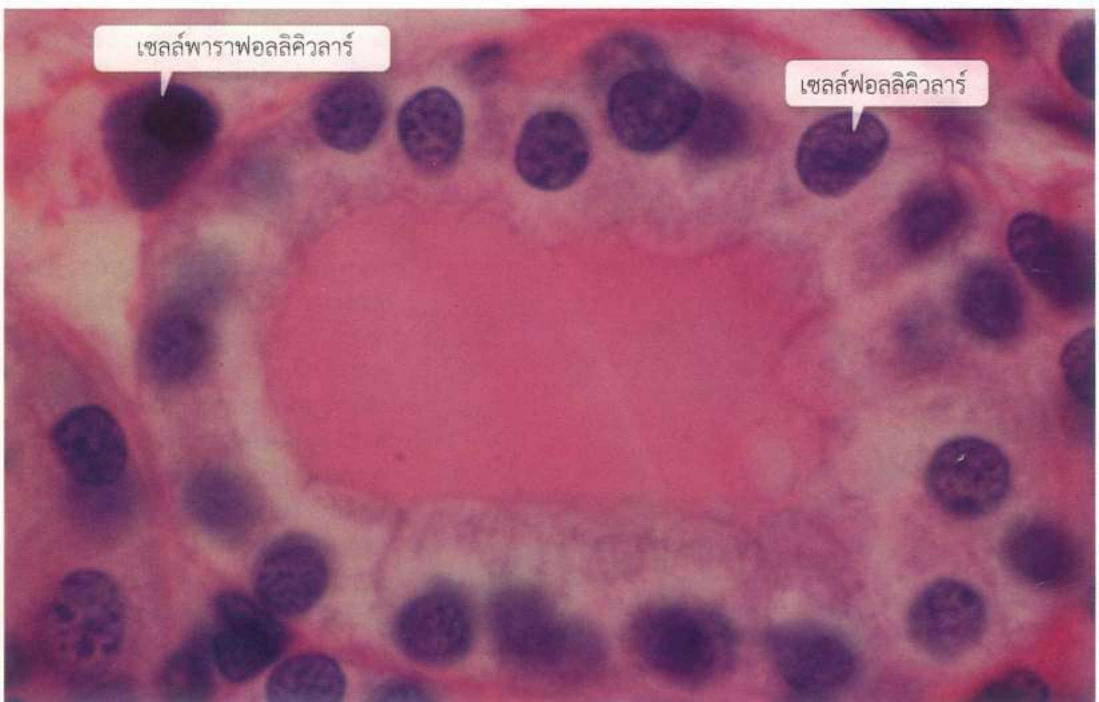


รูป 4.14 การสังเคราะห์ลีดดิงสแทรนด์และแลกกิงสแทรนด์

? หากพิจารณาบริเวณด้านขวาของจุดเริ่มต้นของการจำลองตัว ซึ่ง DNA มีทิศทางการคลายเกลียวและแยกออกจากกันไปในทิศทางด้านขวา DNA สายบนจะยังคงเป็นแม่แบบสำหรับการสร้างลีดดิงสแทรนด์หรือไม่ อย่างไร

4.3.2 การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA

ในร่างกายของมนุษย์มีเซลล์หลายชนิดซึ่งมีรูปร่าง ลักษณะ และหน้าที่ที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีองค์ประกอบของเซลล์โดยเฉพาะโปรตีนที่แตกต่างกัน เช่น ฮีโมโกลบินในเซลล์เม็ดเลือดแดงทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจน นอกจากนี้เซลล์แต่ละชนิดจะสร้างโปรตีนที่แตกต่างกันด้วย เช่น ต่อมไทรอยด์ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด เช่น เซลล์ฟอลลิคิวลาร์ที่มีโปรตีนสำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมนไทรอกซินทำหน้าที่ควบคุมอัตราเมแทบอลิซึมของร่างกาย เซลล์พาราฟอลลิคิวลาร์ที่สร้างฮอร์โมนแคลซิโทนินทำหน้าที่กระตุ้นการสะสมแคลเซียมที่กระดูก ลดการดูดกลับแคลเซียมที่ไตและลดอัตราการดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้เล็ก ดังรูป 4.15 ดังนั้นโปรตีนจึงเกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต



รูป 4.15 ต่อมไทรอยด์

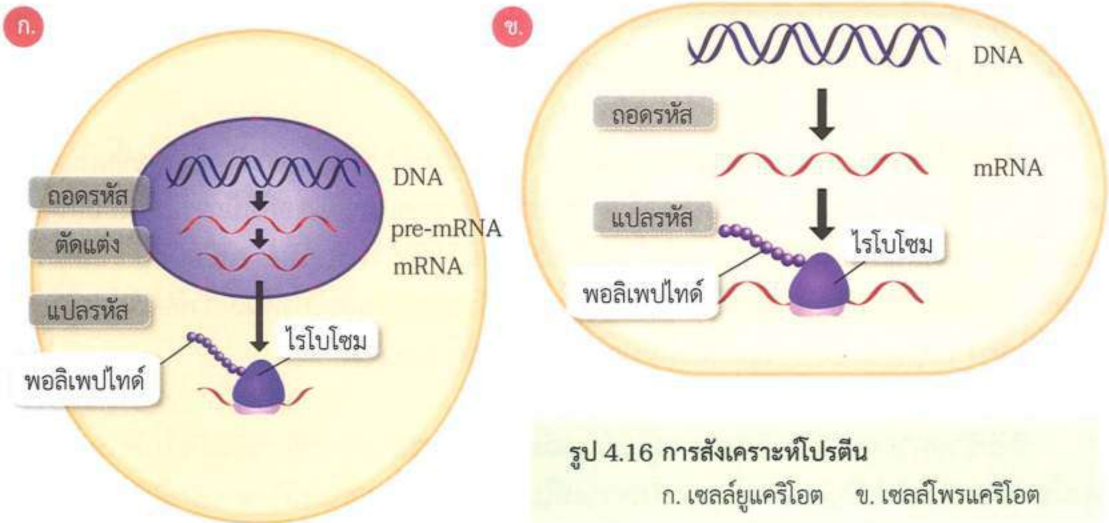
เซลล์ทั้งสองชนิดนี้ในต่อมไทรอยด์มี DNA ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เหมือนกัน **เพราะเหตุใดเซลล์จึงมีรูปร่าง ลักษณะ และหน้าที่ที่แตกต่างกัน**

เซลล์แต่ละชนิดมีการแสดงออกของยีนและการสังเคราะห์โปรตีนที่แตกต่างกัน โดยขึ้นกับกลไกต่าง ๆ ที่ควบคุมการแสดงออกของยีนนั้น ๆ ทำให้สิ่งมีชีวิตหลายเซลล์มีเซลล์ที่มีการแสดงออกหลายแบบเพื่อทำหน้าที่เฉพาะ แม้ว่าเซลล์เหล่านั้นจะมี DNA ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เหมือนกัน จากที่ทราบมาแล้วว่า ยีนเป็นช่วงของ DNA ที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม และโปรตีนเกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรม **DNA และโปรตีนมีความสัมพันธ์กันอย่างไร**

สิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอตมี DNA อยู่ในนิวเคลียส ส่วนการสังเคราะห์โปรตีนเกิดในไซโทพลาซึม ดังนั้น DNA จึงไม่ได้เป็นแม่แบบในการสังเคราะห์โปรตีนโดยตรง จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์พบว่ามี**เมสเซนเจอร์อาร์เอ็นเอ** (messenger RNA; mRNA) เป็นตัวนำข้อมูลทางพันธุกรรมจากยีนบน DNA ที่อยู่ในนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึม ซึ่งมีไรโบโซมทำหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน การนำข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA ไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน ประกอบด้วย

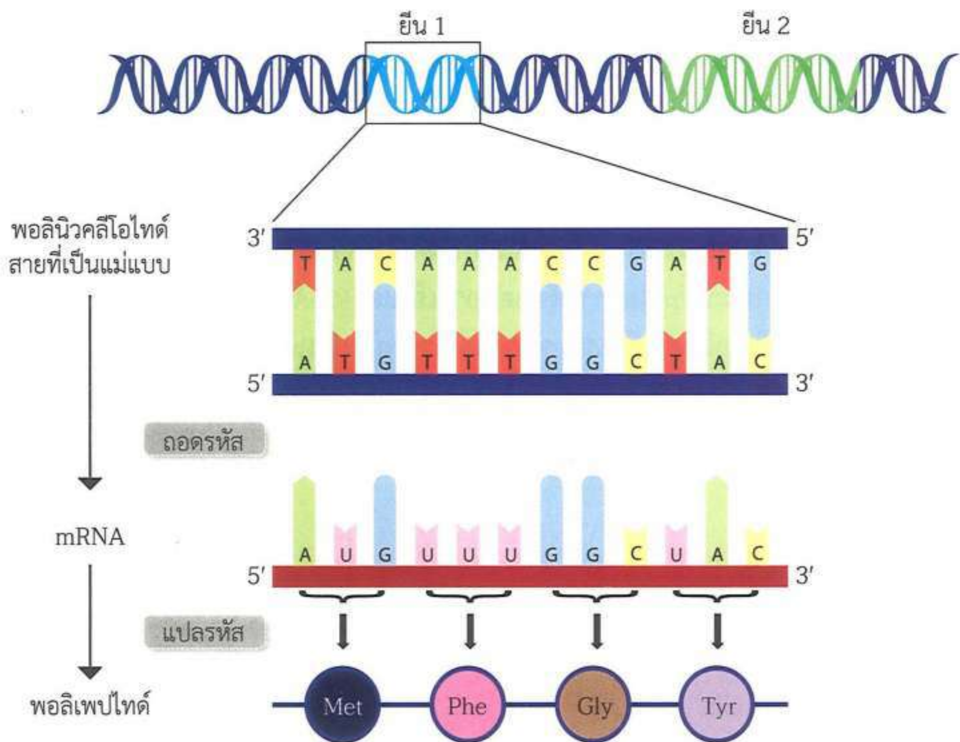
1. การสังเคราะห์ mRNA โดยใช้ DNA เป็นแม่แบบเรียกว่า **การถอดรหัส** (transcription)
2. การสังเคราะห์โปรตีนโดยไรโบโซมจากการอ่านรหัสพันธุกรรมที่เป็นลำดับเบสบน mRNA เรียกว่า **การแปลรหัส** (translation)

การสังเคราะห์โปรตีนในยูแคริโอตจะมีกระบวนการถอดรหัสภายในนิวเคลียสได้เป็น pre-mRNA หลังจากนั้นจะมีขั้นตอนการ**ตัดแต่งอาร์เอ็นเอ** (RNA processing) เพื่อให้ได้ mRNA ที่สมบูรณ์ ที่จะออกจากนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึมแล้วจึงเกิดการแปลรหัสต่อไป ส่วนในโพรแคริโอตจะมีกระบวนการถอดรหัสได้ mRNA และเกิดการแปลรหัสในไซโทพลาซึม ดังรูป 4.16



รูป 4.16 การสังเคราะห์โปรตีน
ก. เซลล์ยูแคริโอต ข. เซลล์โพรแคริโอต

การสังเคราะห์ mRNA ไม่ได้เกิดทั้งสาย DNA แต่จะเกิดเฉพาะบริเวณที่เป็นยีน ซึ่งมีตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของการสังเคราะห์โปรตีน ดังรูป 4.17

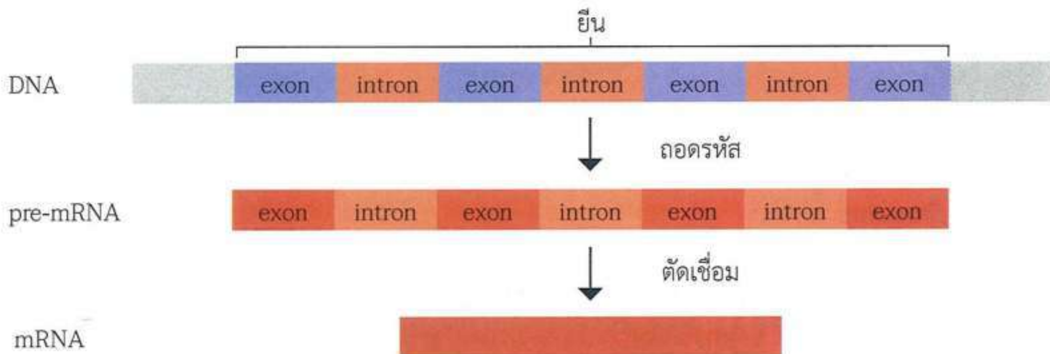


รูป 4.17 การสังเคราะห์โปรตีนโดยใช้ข้อมูลทางพันธุกรรมจาก DNA



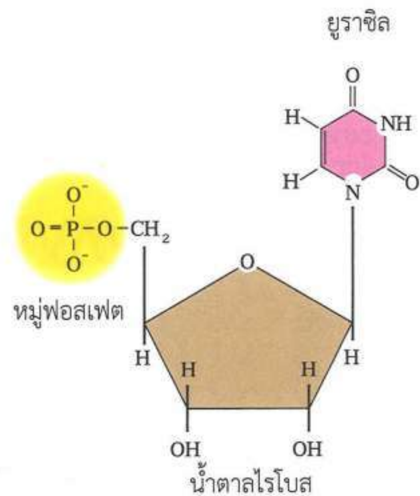
ความรู้เพิ่มเติม

ตัวอย่างหนึ่งของการตัดแต่งอาร์เอ็นเอในยูแคริโอต คือ **การตัดเชื่อมอาร์เอ็นเอ** (RNA splicing) เนื่องจากยีนของเซลล์ยูแคริโอตมีส่วนที่เป็น**เอกซอน** (exon) ซึ่งประกอบด้วยส่วนของลำดับนิวคลีโอไทด์ที่จะแปลรหัสและส่วนที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัส และส่วนที่เป็น**อินทรอน** (intron) ซึ่งเป็นลำดับนิวคลีโอไทด์ในยีนที่ถูกตัดออกไปหลังถอดรหัสจึงไม่ถูกแปลรหัสเป็นโปรตีน หลังจากที่ถอดรหัสได้ pre-mRNA แล้ว จะมีกระบวนการตัดเชื่อมอาร์เอ็นเอที่นำส่วนที่เป็นอินทรอนออกไป และส่วนที่เป็นเอกซอนจะต่อกันได้เป็น mRNA ที่จะนำไปแปลรหัสเป็นสายพอลิเพปไทด์ต่อไป



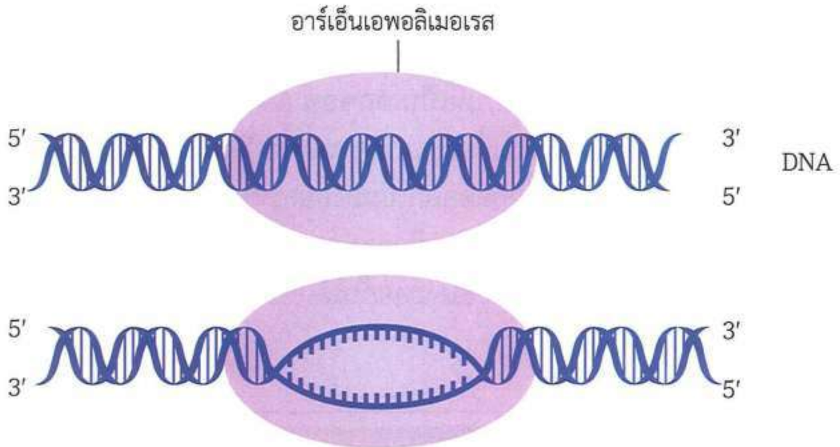
การถอดรหัส

การสังเคราะห์ mRNA โดยใช้ DNA เป็นแม่แบบจะคล้ายกับการจำลอง DNA แต่ใช้ DNA สายเดียวเป็นแม่แบบ โดยการเติมนิวคลีโอไทด์เข้าไปทางปลาย 3′ ของ mRNA ทำให้การสังเคราะห์ mRNA มีทิศทางจากปลาย 5′ ไปยังปลาย 3′ โดยใช้เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรส และนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันตามองค์ประกอบที่เป็นเบส ได้แก่ อะดีนีน (A) กวานีน (G) ไซโทซีน (C) และยูราซิล (U) ดังรูป 4.18

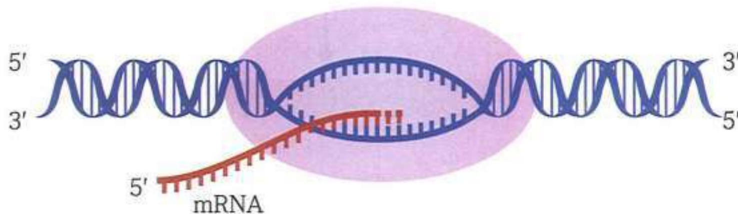


รูป 4.18 นิวคลีโอไทด์ที่มีเบสยูราซิล

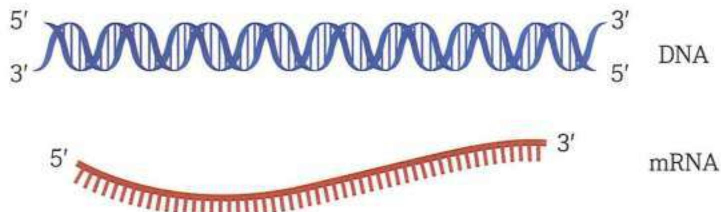
การถอดรหัสมีขั้นตอนดังรูป 4.19



ขั้นเริ่มต้น เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสจะเข้าไปจับกับ DNA ตรงบริเวณที่จะสังเคราะห์ mRNA และสลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างคู่เบส พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายของ DNA จะคลายเกลียวแยกออกจากกัน โดยมีสายหนึ่งของ DNA เป็นแม่แบบ



ขั้นต่อสายยาว นิวคลีโอไทด์ที่มีเบสที่เป็นเบสคู่สมกับดีเอ็นเอแม่แบบ คือ C เข้าคู่กับ G และ U เข้าคู่กับ A จะเข้ามาจับกับนิวคลีโอไทด์ของดีเอ็นเอแม่แบบ เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสจะเชื่อมนิวคลีโอไทด์อิสระด้านปลาย 3′ ได้เป็นสายยาวของ mRNA ทิศทางการสังเคราะห์สาย mRNA จึงเป็นจากปลาย 5′ ไปยังปลาย 3′ ดังนั้นการสร้างสาย mRNA นั้น จะสลับทิศกับสายดีเอ็นเอแม่แบบซึ่งเรียงจากปลาย 3′ ไปยังปลาย 5′



ขั้นสิ้นสุด เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสหยุดทำงานและแยกตัวออกจากดีเอ็นเอแม่แบบ สาย mRNA ที่สังเคราะห์ได้แยกออกจาก DNA

รูป 4.19 ขั้นตอนการถอดรหัส

รหัสพันธุกรรม

โครงสร้างของ DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย นิวคลีโอไทด์ที่เป็นองค์ประกอบของ DNA มี 4 ชนิด ซึ่งเรียงต่อกันได้หลากหลาย จึงเป็นไปได้ว่าความแตกต่างกันทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตขึ้นอยู่กับลำดับและจำนวนของนิวคลีโอไทด์ใน DNA **ลำดับนิวคลีโอไทด์ของ DNA เกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมอย่างไร**

เนื่องจาก DNA เป็นแม่แบบในการสังเคราะห์ mRNA ดังนั้นข้อมูลทางพันธุกรรมใน DNA จะถ่ายทอดให้กับ mRNA โดยการเรียงลำดับของนิวคลีโอไทด์ชนิดต่างๆ ของ mRNA จะเป็นตัวกำหนดการเรียงลำดับของกรดแอมิโนเพื่อสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งเรียกว่า **รหัสพันธุกรรม** (genetic code) จากที่เรียนเรื่องโปรตีนมาแล้วนั้น ทำให้ทราบว่ามีกรดแอมิโน 20 ชนิด **นักเรียนคิดว่าจะต้องใช้นิวคลีโอไทด์จำนวนเท่าใด ต่อ 1 รหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA จึงจะครอบคลุมชนิดของกรดแอมิโนครบทั้ง 20 ชนิด**

โมเลกุลของ RNA เป็นพอลิเมอร์สายยาวของนิวคลีโอไทด์ ซึ่งมีนิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด ถ้ารหัสพันธุกรรม 1 รหัส ประกอบด้วย 1 นิวคลีโอไทด์จะได้รหัสเพียง 4 รหัส และถ้ารหัสพันธุกรรม 1 รหัสประกอบด้วย 2 นิวคลีโอไทด์จะได้รหัสเพียง 16 รหัส (4^2) ซึ่งจำนวนรหัสนี้ไม่เพียงพอกับจำนวนกรดแอมิโนที่มี 20 ชนิด แต่ถ้ารหัสพันธุกรรมประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์ ก็จะได้ 64 รหัส (4^3) ที่เพียงพอกับจำนวนชนิดของกรดแอมิโน

ในปี พ.ศ. 2504 คริกและคณะได้ให้ความเห็นว่า กรดแอมิโนแต่ละโมเลกุลถูกควบคุมด้วยรหัสพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน และในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบรหัสพันธุกรรมรหัสแรกคือ UUU ซึ่งเป็นรหัสของกรดแอมิโนฟีนิลอะลานีน ในเวลาต่อมาพบรหัสพันธุกรรมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 61 รหัสที่กำหนดชนิดของกรดแอมิโน รหัสพันธุกรรมที่เป็น**รหัสสามเบส** (triplet code) ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกันตามลำดับใน mRNA เป็น 1 รหัส เรียกว่า **โคดอน** (codon) ดังตาราง 4.4 แต่ละโคดอนแปลความหมายเป็นกรดแอมิโนแต่ละชนิด ส่วนลำดับเบสของ**ทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอ** (transfer RNA; tRNA) ที่เข้าคู่กับลำดับเบสของโคดอนใน mRNA เรียกว่า **แอนติโคดอน** (anticodon) ซึ่งประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เช่นกัน

ตาราง 4.4 รหัสพันธุกรรม

เบสตำแหน่งที่ 2

เบสตำแหน่งที่ 1	U		C		A		G		เบสตำแหน่งที่ 3
U	UUU	Phe	UCU	Ser	UAU	Tyr	UGU	Cys	U
U	UUC	Phe	UCC	Ser	UAC	Tyr	UGC	Cys	C
U	UUA	Leu	UCA	Ser	UAA	stop	UGA	stop	A
U	UUG	Leu	UCG	Ser	UAG	stop	UGG	Trp	G
C	CUU	Leu	CCU	Pro	CAU	His	CGU	Arg	U
C	CUC	Leu	CCC	Pro	CAC	His	CGC	Arg	C
C	CUA	Leu	CCA	Pro	CAA	Gln	CGA	Arg	A
C	CUG	Leu	CCG	Pro	CAG	Gln	CGG	Arg	G
A	AUU	Ile	ACU	Thr	AAU	Asn	AGU	Ser	U
A	AUC	Ile	ACC	Thr	AAC	Asn	AGC	Ser	C
A	AUA	Ile	ACA	Thr	AAA	Lys	AGA	Arg	A
A	AUG	Met	ACG	Thr	AAG	Lys	AGG	Arg	G
G	GUU	Val	GCU	Ala	GAU	Asp	GGU	Gly	U
G	GUC	Val	GCC	Ala	GAC	Asp	GGC	Gly	C
G	GUA	Val	GCA	Ala	GAA	Glu	GGA	Gly	A
G	GUG	Val	GCG	Ala	GAG	Glu	GGG	Gly	G

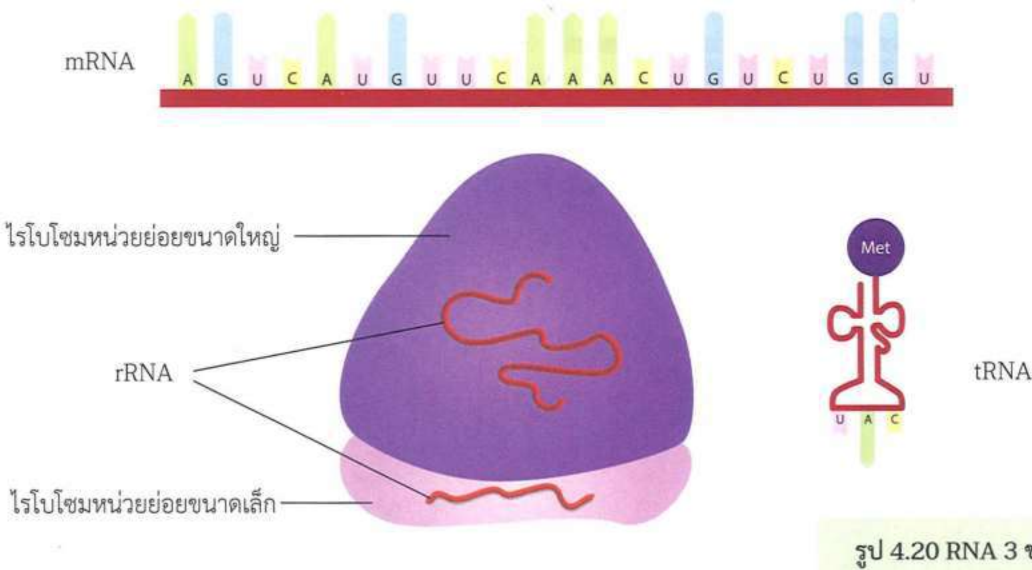
Phe หมายถึง ฟีนิลอะลานีน
Leu หมายถึง ลิวซีน
Ser หมายถึง ซีรีน
Tyr หมายถึง ไทโรซีน
Cys หมายถึง ซิสเทอีน
Trp หมายถึง ทริปโตเฟน
Pro หมายถึง โพรลีน
His หมายถึง ฮิสทิดีน
Gln หมายถึง กลูตามีน
Arg หมายถึง อาร์จินีน
Ile หมายถึง ไอโซลิวซีน
Met หมายถึง เมไทโอนีน
Thr หมายถึง ทรีโอนีน
Asn หมายถึง แอสพาราจีน
Lys หมายถึง ไลซีน
Val หมายถึง วาลีน
Ala หมายถึง อะลานีน
Asp หมายถึง กรดแอสพาร์ติก
Glu หมายถึง กรดกลูตามิก
Gly หมายถึง ไกลซีน
(สีม่วง) รหัสเริ่มต้น
(สีชมพู) รหัสหยุด

นอกจากรหัส 61 รหัสที่กำหนดชนิดของกรดแอมิโนแล้ว ยังมีอีก 3 รหัส คือ UAA UAG และ UGA ที่ไม่กำหนดกรดแอมิโนชนิดใด ๆ ซึ่ง 3 รหัสนี้เป็นรหัสที่ทำให้การแปลรหัสสิ้นสุดลง เรียกว่า **รหัสหยุด** (stop codon) นอกจากนี้พบว่า AUG ซึ่งเป็นรหัสของกรดแอมิโนเมไทโอนีน ทำหน้าที่เป็น **รหัสเริ่มต้น** (start codon) ของการสังเคราะห์โปรตีนอีกด้วย

ลำดับนิวคลีโอไทด์บน mRNA ทำหน้าที่กำหนดชนิดและลำดับของกรดแอมิโนในสายพอลิเพปไทด์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยที่ลำดับนิวคลีโอไทด์บน mRNA ซึ่งทำหน้าที่เป็นรหัสพันธุกรรมสำหรับกรดแอมิโนนี้ได้จากการถอดรหัสพันธุกรรมจาก DNA

การแปลรหัส

จากการศึกษาการแปลรหัสพบว่ามี RNA ที่สำคัญ 3 ชนิด ดังรูป 4.20 แต่ละชนิดทำหน้าที่แตกต่างกัน คือ mRNA ทำหน้าที่นำรหัสการสังเคราะห์โปรตีนจาก DNA ไปยังไรโบโซม ส่วน tRNA ทำหน้าที่นำกรดแอมิโนที่จำเพาะกับรหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA มาต่อเป็นสายพอลิเพปไทด์ และ **ไรโบโซมัลอาร์เอ็นเอ** (ribosomal RNA; rRNA) เป็นองค์ประกอบของไรโบโซม ซึ่งเป็นออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีน



รูป 4.20 RNA 3 ชนิด

เมื่อมีการถอดรหัสจาก DNA ได้เป็น mRNA แล้ว จะนำไปสังเคราะห์โปรตีนโดยการแปลรหัส โดย tRNA จะนำกรดแอมิโนมาเรียงต่อกันตามรหัสพันธุกรรมของ mRNA ได้เป็นสายพอลิเพปไทด์

การแปลรหัสมีขั้นตอนดังรูป 4.21

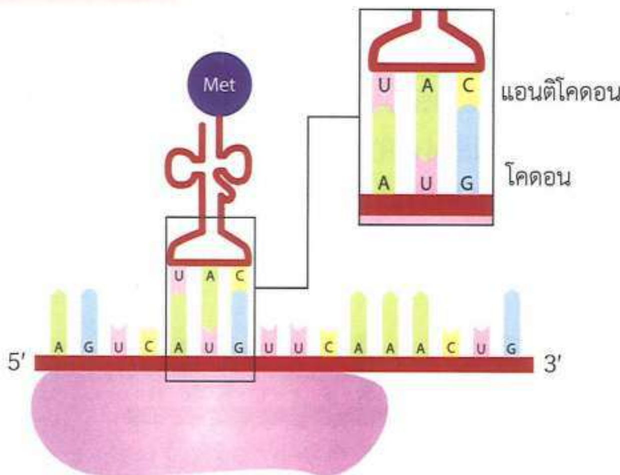
ไรโบโซมจะเคลื่อนที่ไปบน mRNA จากปลาย 5′ ไปยังปลาย 3′ การแปลรหัสจะเริ่มที่โคดอนที่เป็นรหัสเริ่มต้น (AUG) แล้วเคลื่อนที่ไปทีละโคดอนตามลำดับ โมเลกุลของ tRNA มีแอนติโคดอนที่จะเข้าคู่กับโคดอนของ mRNA โดย tRNA 1 โมเลกุล นำกรดแอมิโนที่จำเพาะกันได้ 1 โมเลกุล มายังไรโบโซม



ความรู้เพิ่มเติม

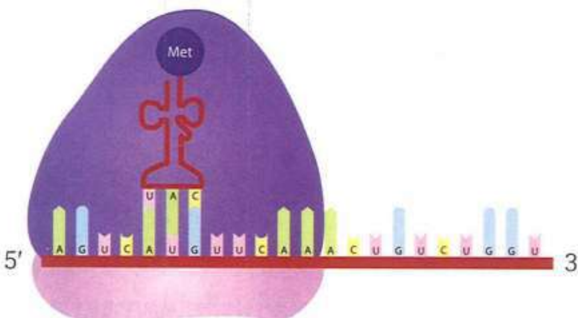
tRNA และ rRNA เป็นผลผลิตจากการถอดรหัสของยีนบน DNA แต่ไม่มีการแปลรหัสต่อไป

1. ขั้นเริ่มต้น



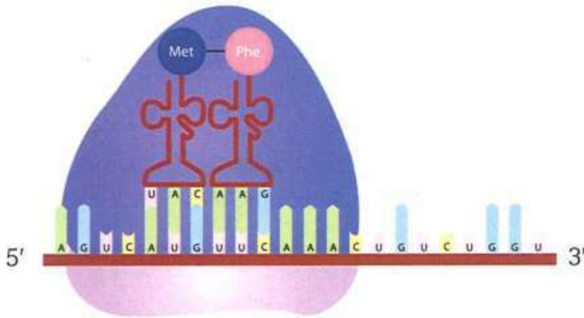
ไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดเล็กมาจับกับ mRNA แล้ว tRNA นำกรดแอมิโนเมไทโอนีนเริ่มต้น มายังรหัสเริ่มต้น AUG ของ mRNA

2. ขั้นการต่อสายยาว

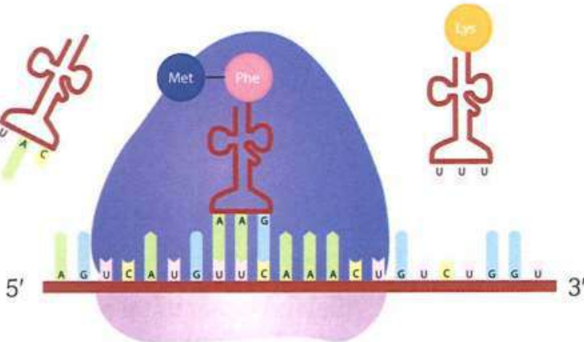


ไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดใหญ่จะเข้ามาจับกับไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดเล็ก จึงทำให้ไรโบโซมพร้อมจะทำงานต่อไป

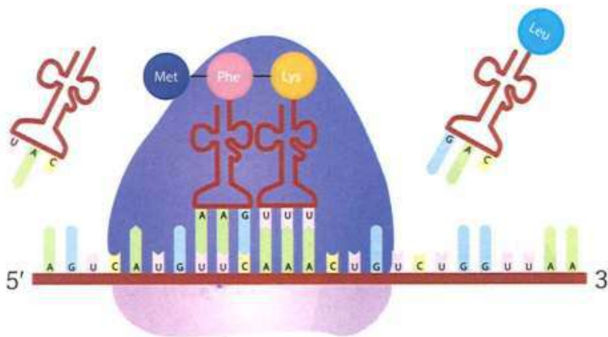
รูป 4.21 ขั้นตอนการแปลรหัส



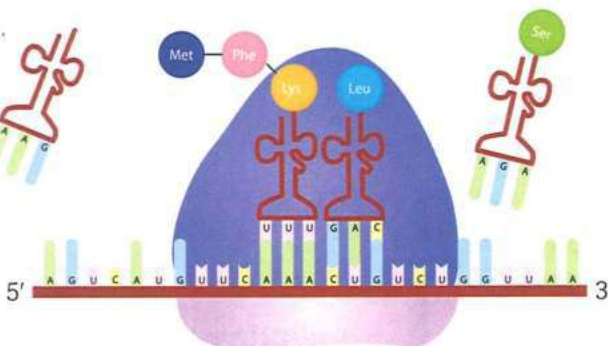
tRNA โมเลกุลที่ 2 ที่มีแอนติโคดอนเป็นคู่สมกับโคดอนถัดไปของ mRNA นำกรดแอมิโนโมเลกุลที่ 2 เข้ามาเรียงต่อกับกรดแอมิโนโมเลกุลแรก สร้างพันธะเพปไทด์เชื่อมระหว่างกรดแอมิโนทั้งสองโมเลกุล โดยที่หมู่แอมิโนของกรดแอมิโนตัวที่ 2 ทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของกรดแอมิโนตัวแรกบน tRNA



ไรโบโซมจะเคลื่อนที่ไปยังโคดอนถัดไปในทิศทางจากปลาย 5′ ไปยังปลาย 3′ ซึ่ง tRNA โมเลกุลแรกจะหลุดออกจากไรโบโซมและสาย mRNA

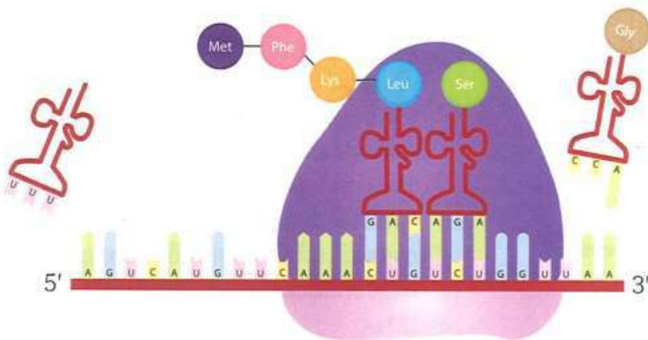


tRNA โมเลกุลที่ 3 ที่มีแอนติโคดอนเป็นคู่สมกับโคดอนถัดไปของ mRNA นำกรดแอมิโนตัวที่ 3 เข้ามาเรียงต่อกับกรดแอมิโนตัวที่ 2 แล้วสร้างพันธะเพปไทด์เชื่อมระหว่างกรดแอมิโนตัวที่ 2 และกรดแอมิโนตัวที่ 3



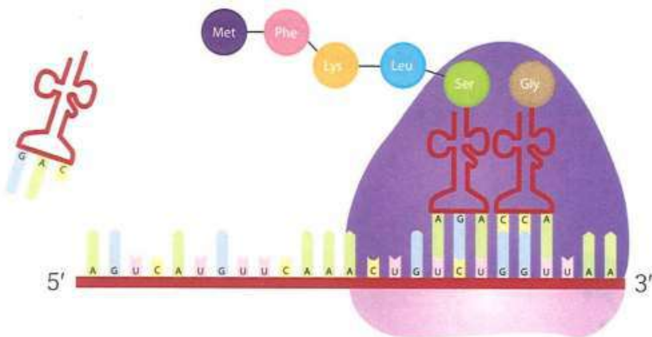
ไรโบโซมจะเคลื่อนที่ต่อไปทีละโคดอนตามลำดับ และกระบวนการต่าง ๆ จะดำเนินต่อไปเช่นเดียวกับที่กล่าวมา

รูป 4.21 ขั้นตอนการแปลรหัส

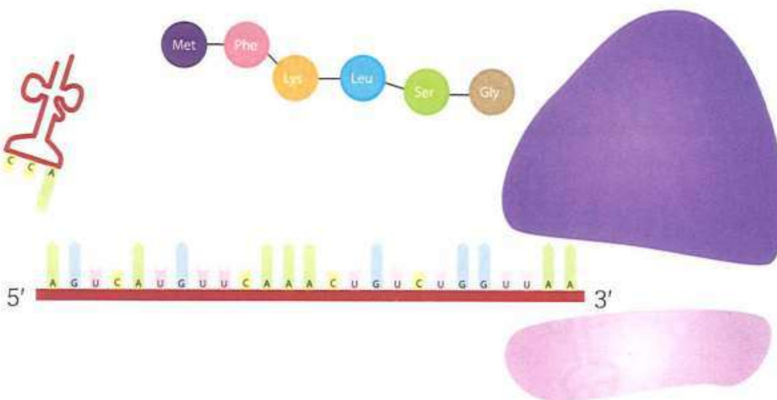


กรดอะมิโนจะมาเรียงต่อกันได้เป็นสายพอลิเพปไทด์

3. ขั้นสิ้นสุด



เมื่อไรโบโซมเคลื่อนที่บน mRNA จนพบกับรหัสหยุด ซึ่งอาจเป็น UAA UAG หรือ UGA รหัสใดรหัสหนึ่ง จะไม่มี tRNA เข้ามาจับทำให้หยุดการแปลรหัส



พอลิเพปไทด์จะแยกจาก tRNA โมเลกุลสุดท้าย ไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดเล็กและหน่วยย่อยขนาดใหญ่จะแยกออกจากกัน และ mRNA จะหลุดออกจากไรโบโซม

รูป 4.21 ขั้นตอนการแปลรหัส

สายพอลิเพปไทด์ที่สังเคราะห์ได้อาจเกิดการพับม้วนเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะ 3 มิติหรือมีการเข้าจับกับพอลิเพปไทด์มากกว่า 1 สาย ซึ่งอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันเพื่อให้ได้โปรตีนที่มีความเหมาะสมและพร้อมจะทำงานได้ ซึ่งโปรตีนอาจประกอบด้วยพอลิเพปไทด์จำนวน 1 สายหรือมากกว่า 1 สายขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีน ซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดมีรูปร่างและหน้าที่แตกต่างกัน เช่น บางชนิดเป็นเอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาต่าง ๆ บางชนิดเป็นองค์ประกอบของโครงสร้าง เช่น คอลลาเจนและเคอราทินในสัตว์ และโปรตีนที่ผนังเซลล์ของพืช

ถึงแม้ว่าเซลล์ทุกเซลล์ในมนุษย์คนหนึ่งจะมีข้อมูลทางพันธุกรรมเหมือนกัน แต่ยีนแต่ละยีนไม่ได้แสดงออกในทุกเซลล์ ยีนบางยีน เช่น ไมโอโกลบินอาจมีการแสดงออกโดยการผลิต mRNA และสังเคราะห์โปรตีนเฉพาะในเซลล์กล้ามเนื้อ แต่ในขณะเดียวกันยีนบางยีน เช่น ยีนผลิตเอนไซม์มอลเทสอาจจะแสดงออกเฉพาะในเซลล์บุผนังลำไส้เล็ก จึงทำให้เซลล์เหล่านั้นมีรูปร่างและการทำงานที่แตกต่างกัน



กิจกรรม 4.2 การถอดรหัสและการแปลรหัส

จุดประสงค์

นำหลักการถอดรหัสและการแปลรหัสมาใช้แก้โจทย์ปัญหา

วิธีการทำกิจกรรม

จากลำดับนิวคลีโอไทด์ของ DNA ที่กำหนดให้ อักษรสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่เป็นยีน และให้ DNA สายล่างเป็นแม่แบบสำหรับการถอดรหัส

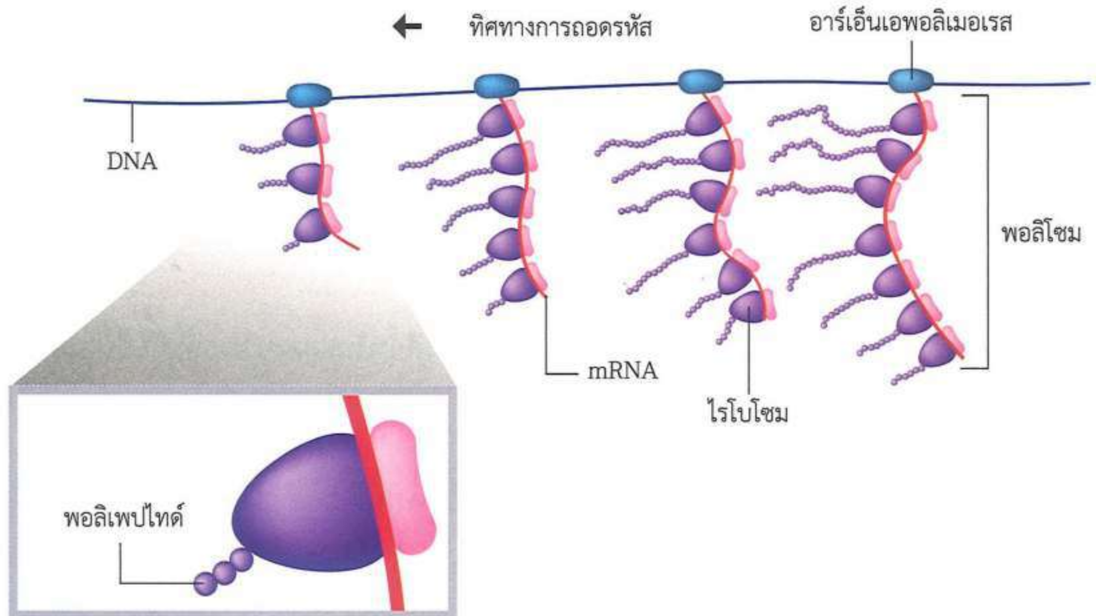
5′CGCAGATTCGATGGCCCTGTGGATACGCCTCCTGCCCTGAAGCTCTCT3′
3′GCGTCTAAGCTACCGGGACACCTATGCGGAGGACGGGACTTCGAGAGA5′

คำถามท้ายกิจกรรม

- ? mRNA ที่ได้จากการถอดรหัสจะมีลำดับเบสเป็นอย่างไร
- ? เมื่อสิ้นสุดการแปลรหัสจะได้สายพอลิเพปไทด์ที่มีกรดแอมิโนกี่โมเลกุล
- ? สายพอลิเพปไทด์ที่ได้จากการแปลรหัสมีลำดับกรดแอมิโนเป็นอย่างไร

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตต้องการใช้โปรตีนแต่ละชนิดจำนวนมากในการดำรงชีวิต **ถ้า mRNA 1 สายสามารถเป็นแม่แบบในการแปลรหัสได้พอลิเพปไทด์ครั้งละ 1 สาย เซลล์จะผลิตโปรตีนได้เท่าใดสำหรับนำมาใช้ภายในสิ่งมีชีวิต**

กระบวนการสังเคราะห์โปรตีนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการทำงานของไรโบโซมหลายไรโบโซมที่อยู่บน mRNA สายเดียวกัน เมื่อไรโบโซมแรกเคลื่อนที่ห่างไปจากรหัสเริ่มต้น อีกไรโบโซมหนึ่งก็จะเข้าจับกับสาย mRNA แล้วเริ่มแปลรหัส แต่ละไรโบโซมจะสังเคราะห์พอลิเพปไทด์ที่สมบูรณ์และเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ทำให้ในการสังเคราะห์โปรตีนส่วนใหญ่เมื่อถอดรหัสได้ mRNA จำนวน 1 สาย จะสามารถเป็นแม่แบบในการแปลรหัสได้สายพอลิเพปไทด์ที่เหมือนกันจำนวนมาก เรียกกลุ่มของไรโบโซมที่อยู่บน mRNA เดียวกันที่กำลังแปลรหัสอยู่นี้ว่า **พอลิโซม** (polysome) หรือ**พอลิไรโบโซม** (polyribosome) ดังรูป 4.22



รูป 4.22 การเกิดพอลิโซม

การสังเคราะห์โปรตีนในโพรแคริโอตสามารถเกิดขึ้นได้ โดย mRNA ที่สังเคราะห์มาจาก DNA จะถูกนำไปแปลรหัสทันทีทั้งที่กระบวนการถอดรหัสยังไม่สิ้นสุดลง ส่วนการสังเคราะห์โปรตีนในยูแคริโอตจะมีความซับซ้อนกว่า โดยกระบวนการถอดรหัสเกิดภายในนิวเคลียส จากนั้น mRNA จะออกจากนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึมแล้วจึงมีการแปลรหัสเกิดขึ้น

ยีนแต่ละยีนสามารถเป็นแม่แบบในการสร้าง mRNA ได้หลายโมเลกุล และ mRNA แต่ละโมเลกุลก็ถูกใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนได้หลายโมเลกุลเช่นกัน เช่น ในจีโนมของมนุษย์มียีนที่ควบคุมการสร้างอินซูลินเพียง 1 ยีน สามารถถอดรหัสได้เป็น mRNA ได้หลายโมเลกุล ซึ่ง mRNA แต่ละโมเลกุลสามารถแปลรหัสได้อินซูลินหลายโมเลกุล จึงเป็นไปได้ว่าเซลล์ไม่จำเป็นต้องมีจีโนมขนาดใหญ่มากหรือมียีนที่มีจำนวนซ้ำหลาย ๆ ตำแหน่งเพื่อใช้ในการผลิตให้ได้โปรตีนจำนวนมาก

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่า DNA เกี่ยวข้องกับการแสดงลักษณะของสิ่งมีชีวิต ซึ่งความสำคัญของ DNA คือ เป็นแหล่งเก็บข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตแล้วถ่ายทอดข้อมูลให้กับ RNA และแปลรหัสจาก RNA เป็นกรดแอมิโน DNA ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนได้เป็นโปรตีนโครงสร้าง โปรตีนที่เป็นเอนไซม์ และโปรตีนอื่น ๆ ภายในเซลล์ ซึ่งมีผลให้เซลล์และสิ่งมีชีวิตปรากฏลักษณะต่าง ๆ ได้ สามารถเขียนสรุปได้ดังนี้



4.4 มิวเทชัน

เมื่อสังเกตสิ่งมีชีวิตสปีชีส์หนึ่ง ๆ จะพบว่าลูกมีลักษณะคล้ายพ่อแม่ แต่อาจมีบางตัวที่มีลักษณะต่างไปจากตัวอื่น เช่น เก้งที่มีขนสีขาวซึ่งเป็นลักษณะเผือก ดังรูป 4.23 และสามารถถ่ายทอดลักษณะนั้น ๆ ไปยังลูกหลานรุ่นต่อ ๆ ไปได้ **เพราะเหตุใดสิ่งมีชีวิตจึงมีลักษณะแตกต่างไปจากเดิม**

อาจเป็นไปได้ว่ายีนหรือ DNA ที่ควบคุมลักษณะนั้นมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลให้ลักษณะปรากฏหรือฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนไป และสามารถถ่ายทอดลักษณะไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้ เรียกว่า **การกลายหรือมิวเทชัน** (mutation)

มิวเทชันที่เกิดตามธรรมชาติเกิดขึ้นในอัตราต่ำมาก อย่างไรก็ตามมีสิ่งที่สามารถกระตุ้นหรือชักนำให้เกิดมิวเทชันในอัตราที่สูงขึ้นได้ เรียกว่า**สิ่งก่อการกลาย**หรือ**มิวทาเจน** (mutagen) ซึ่งมีทั้งที่เป็นรังสี เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเลต และสารเคมี เช่น สารในควันบุหรี่ อะฟลาทอกซินที่ผลิตจากเชื้อราซึ่งปนเปื้อนในอาหาร มิวทาเจนทำให้เกิดการแบ่งเซลล์ผิดปกติและเจริญอย่างควบคุมไม่ได้ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดมะเร็ง ดังนั้นมิวทาเจนบางชนิดจึงเป็น**สิ่งก่อมะเร็ง** (carcinogen)



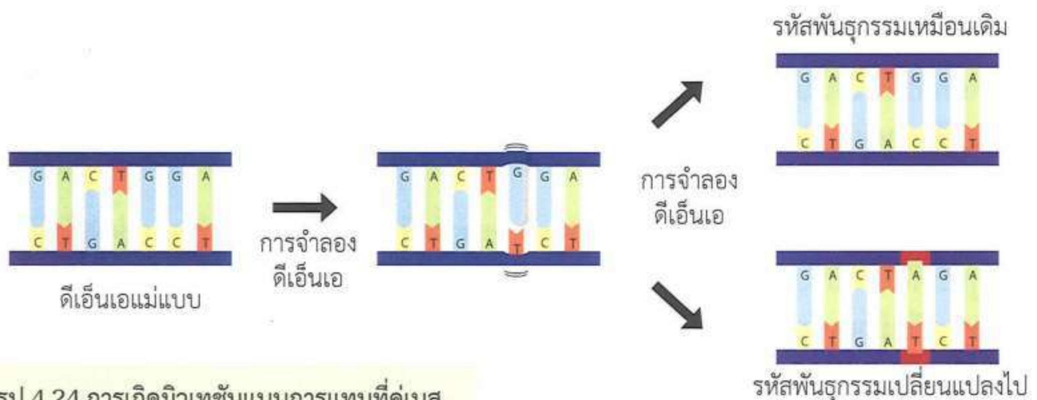
รูป 4.23 เก้งและเก้งเผือก

การเกิดมิวเทชันแบ่งออกเป็นมิวเทชันระดับยีนและมิวเทชันระดับโครโมโซม มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 มิวเทชันระดับยีน

โดยทั่วไปเมื่อ DNA มีการจำลองตัวจะได้ DNA โมเลกุลใหม่ที่มีจำนวนและลำดับการเรียงตัวของนิวคลีโอไทด์เหมือน DNA โมเลกุลเดิมทุกประการ แต่ในบางครั้งการจำลองตัวเองของ DNA อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ มิวเทชันระดับยีนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงชนิดและจำนวนนิวคลีโอไทด์บนสาย DNA จากการศึกษาพบว่า DNA จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้หลายลักษณะ เช่น เบสในนิวคลีโอไทด์เปลี่ยนไปเป็นชนิดอื่น นิวคลีโอไทด์ขาดหายหรือเพิ่มขึ้น การเกิดมิวเทชันในบริเวณที่เป็นยีนมี 2 แบบคือ

1. **การแทนที่คู่เบส** (base-pair substitution) เป็นการแทนที่คู่เบสในบางตำแหน่งของยีน ดังรูป 4.24

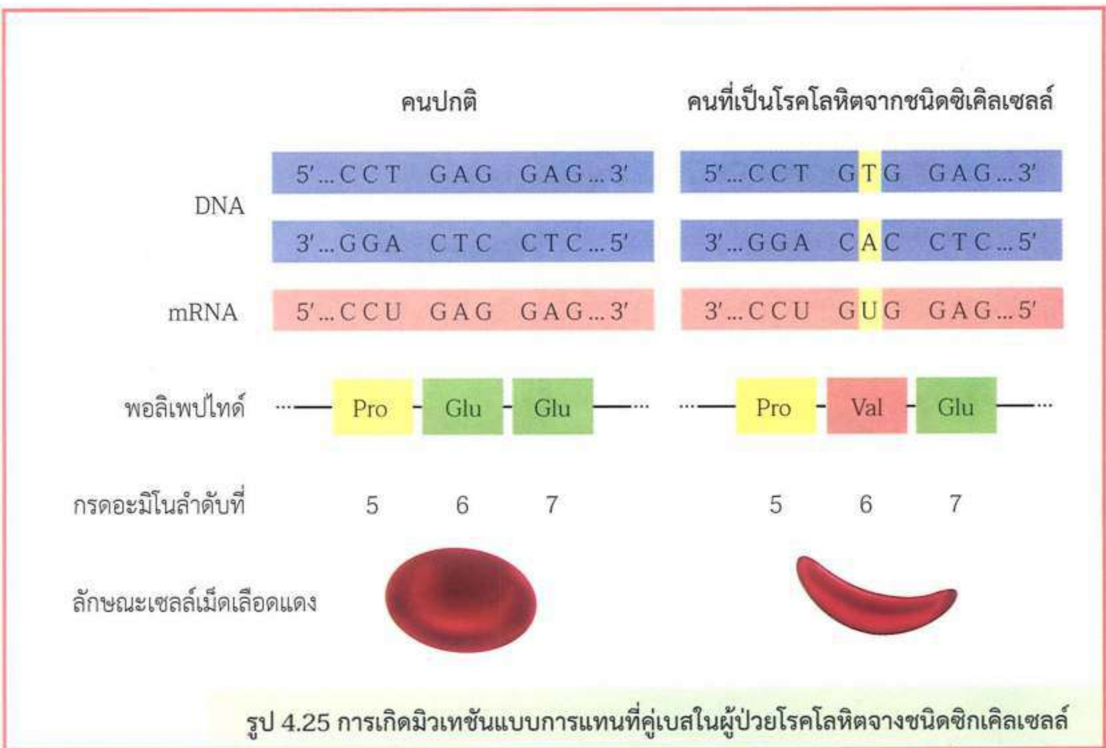


รูป 4.24 การเกิดมิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบส

? จากรูป 4.24 การเปลี่ยนแปลงของเบสใน DNA เป็นอย่างไร และส่งผลอย่างไรต่อ DNA สายใหม่

การเกิดมิวเทชันในบริเวณ DNA ที่เป็นตำแหน่งของยีน อาจมีหรือไม่มีผลต่อการแสดงลักษณะทางพันธุกรรม **ถ้ามิวเทชันนั้นทำให้สายพอลิเพปไทด์เปลี่ยนไปจากเดิม จะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตอย่างไร**

ถ้าการเปลี่ยนแปลงลำดับของกรดแอมิโนเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความสำคัญต่อการจัดรูปร่างของโปรตีน หรือมีความจำเพาะต่อการทำงานของโปรตีนชนิดนั้น จะมีผลต่อฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิต เช่น การเกิด**โรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์** (sickle cell anemia) ซึ่งเป็นมิวเทชันในยีนที่สร้างฮีโมโกลบินสายบีตา ทำให้โคดอนของกรดแอมิโนชนิดกรดกลูตามิกเปลี่ยนเป็นโคดอนของวาลีน ดังรูป 4.25



รูป 4.25 การเกิดมิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบสในผู้ป่วยโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์

? ผู้ป่วยโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์มีลำดับของกรดแอมิโนในฮีโมโกลบินสายบีตาแตกต่างจากคนปกติอย่างไร

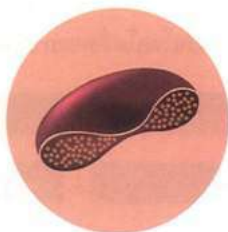
? ลักษณะทางพันธุกรรมของโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์เกี่ยวข้องกับ DNA และโปรตีนอย่างไร



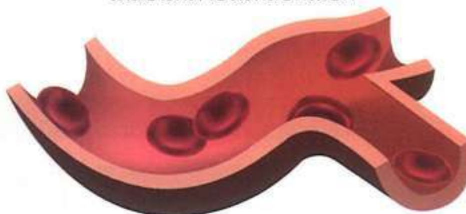
รู้หรือไม่

เซลล์เม็ดเลือดแดงเป็นรูปเคียวเนื่องจากความผิดปกติของฮีโมโกลบินที่ต่อเป็นสายยาว ทำให้ไม่สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ตามปกติ เซลล์เม็ดเลือดแดงเสียคุณสมบัติในการยืดหยุ่น เมื่อเคลื่อนที่ไปตามหลอดเลือดฝอยจะเกิดการอุดตันที่บริเวณต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเกิดภาวะอื่น ๆ เช่น ปวด อัมพฤกษ์ และอัมพาต เซลล์เม็ดเลือดแดงรูปเคียวจะแตกง่ายกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงปกติจึงทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง

เซลล์เม็ดเลือดแดงปกติ



เซลล์เม็ดเลือดแดงปกติ
เคลื่อนที่ภายในหลอดเลือด





เซลล์เม็ดเลือดแดงรูปเคียว



เซลล์เม็ดเลือดแดงรูปเคียว
อุดตันภายในหลอดเลือด

อย่างไรก็ตามการแทนที่คู่เบสอาจมีหรือไม่มีผลต่อการแสดงลักษณะทางพันธุกรรมก็ได้ ดังรูป 4.26 เนื่องจากโคดอนหลายชนิดเป็นรหัสของกรดแอมิโนชนิดเดียวกัน เช่น UGU และ UGC เป็นรหัสของซิสเทอีน (Cys)

ก. เบสปกติ

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACG	ACA	CCA	ATA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGC	UGU	GGU	UAU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	Cys	Cys	Gly	Tyr	

ข. มีการแทนที่คู่เบสแล้วได้กรดแอมิโนชนิดเดิม ถ้ามีการเกิดมิวเทชันเฉพาะจุดที่มีการเปลี่ยนรหัสจาก UGU ไปเป็น UGC จะไม่มีผลต่อฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตนั้น เนื่องจากเมื่อแปลรหัสแล้วจะได้กรดแอมิโนชนิดเดิมในสายพอลิเพปไทด์

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACG	ACG	CCA	ATA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGC	UGC	GGU	UAU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	Cys	Cys	Gly	Tyr	

ค. มีการแทนที่คู่เบสแล้วได้กรดแอมิโนชนิดใหม่ ถ้าเป็นการแทนที่คู่เบสแล้วมีผลทำให้โคดอนเปลี่ยนไปเป็นรหัสพันธุกรรมของกรดแอมิโนต่างชนิดกัน จะทำให้สายพอลิเพปไทด์มีลำดับของกรดแอมิโนที่ต่างไปจากเดิม

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACG	ACC	CCA	ATA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGC	UGG	GGU	UAU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	Cys	Trp	Gly	Tyr	

ง. มีการแทนที่คู่เบสแล้วเปลี่ยนเป็นรหัสหยุด ถ้าการเกิดมิวเทชันนั้นเปลี่ยนแปลงไปเป็น UGA ซึ่งเป็นรหัสหยุด จะทำให้การแปลรหัสนั้นสิ้นสุดลง ทำให้ได้สายพอลิเพปไทด์ที่สั้นลง ซึ่งอาจทำให้โปรตีนไม่สามารถทำงานได้

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACG	ACT	CCA	ATA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGC	UGA	GGU	UAU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	Cys	Stop			

รูป 4.26 ผลของมิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบส

? การเกิดมิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบสทำให้เกิดผลเสียเสมอไปหรือไม่ เพราะเหตุใด

2. **การเพิ่มขึ้นหรือขาดหายของนิวคลีโอไทด์** (insertion or deletion of nucleotide) เป็นการเพิ่มขึ้นหรือขาดหายไปของคู่นิวคลีโอไทด์ในบางตำแหน่งของยีน ดังรูป 4.27 มักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการทำงานของพอลิเพปไทด์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนนิวคลีโอไทด์ 1-2 นิวคลีโอไทด์ในบริเวณที่เป็นโคดอน ซึ่งถ้าจำนวนนิวคลีโอไทด์ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่ได้เป็นชุดของ 3 นิวคลีโอไทด์จะมีผลทำให้ลำดับกรดแอมิโนตั้งแต่ตำแหน่งที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโคดอนเปลี่ยนไป เรียกว่า **เฟรมชิฟท์มิวเทชัน** (frameshift mutation) ซึ่งมักจะทำให้เกิดรหัสหยุดก่อนรหัสหยุดเดิม และทำให้พอลิเพปไทด์มีขนาดสั้นลง

ก. นิวคลีโอไทด์ปกติ

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACG	TTA	TCA	ATA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGC	AAU	AGU	UAU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	Cys	Asn	Ser	Tyr	

ข. นิวคลีโอไทด์เพิ่มขึ้น (T ↓)

DNA	3′ -	TAC	TTC	CCG	AAC	GTT	ATC	AAT	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AAG	GGC	UUG	CAA	UAG	UUA	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Lys	Gly	Leu	Gln	STOP		

ค. นิวคลีโอไทด์ขาดหาย (G ↑)

DNA	3′ -	TAC	TCC	CGA	ACT	TAT	CAA	TA	- 5′
mRNA	5′ -	AUG	AGG	GCU	UGA	AUA	GUU	AU	- 3′
พอลิเพปไทด์		Met	Arg	Ala	STOP				

รูป 4.27 การเกิดเฟรมชิฟท์มิวเทชัน

เมื่อนิวคลีโอไทด์ใน DNA เพิ่มขึ้นหรือลดลง โคดอนที่เรียงกันใน mRNA จะเปลี่ยนไปด้วย เมื่อนำข้อมูลจากรูป 4.27 มาเรียงเปรียบเทียบ โดยเทียบระหว่างโคดอนจาก DNA ปกติกับโคดอนที่นิวคลีโอไทด์ใน DNA เกิดเฟรมชิฟท์มิวเทชัน โคดอนที่เปลี่ยนไปจะเป็นดังรูป 4.28

ปกติ	A U G | A G G | G C U | U G C | A A U | A G U | U A U
เปลี่ยนไปแบบที่ 1	A U G | A A G | G G C | U U G | C A A | U A G | U U A
เปลี่ยนไปแบบที่ 2	A U G | A G G | G C U | U G A | A U A | G U U | A U

รูป 4.28 โคดอนที่เปลี่ยนไปจากการเกิดเฟรมชิฟท์มิวเทชัน

? มิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบสและเฟรมชิฟท์มิวเทชัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง DNA และมีผลต่อการแสดงลักษณะของสิ่งมีชีวิตแตกต่างกันอย่างไร



ตรวจสอบความเข้าใจ

? การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ DNA อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรหัสพันธุกรรมและการสังเคราะห์โปรตีนอย่างไร

มิวเทชันเกิดขึ้นได้ทั้งในเซลล์ร่างกายและเซลล์สืบพันธุ์ ซึ่งจะถ่ายทอดลักษณะต่อไปหรือไม่ก็ได้ ถ้ามิวเทชันเกิดขึ้นที่เซลล์สืบพันธุ์ ยีนที่เกิดมิวเทชันจะสามารถส่งต่อไปยังรุ่นลูกได้โดยตรง แต่ถ้ามิวเทชันเกิดกับเซลล์ร่างกาย ก็ขึ้นอยู่กับว่าเซลล์ร่างกายนั้นจะมีการพัฒนาให้เกิดการสืบพันธุ์ได้หรือไม่ เช่น ในกรณีของพืช หากเกิดมิวเทชันที่เซลล์เนื้อเยื่อบริเวณตาข้าง ซึ่งเป็นเซลล์ร่างกายก็จะทำให้กิ่งที่เจริญขึ้นมาใหม่มีลักษณะต่างไปจากเดิม เมื่อนำกิ่งนั้นไปขยายพันธุ์ก็จะได้ต้นพืชที่มีลักษณะพันธุกรรมต่างไปจากเดิม เมื่อพืชต้นนั้นออกดอกและติดผล ลักษณะดังกล่าวก็สามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกหลานได้

หากเป็นการเกิดมิวเทชันระดับยีน จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของยีนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และสีย้อมโครโมโซมได้ยาก แต่หากมิวเทชันที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในระดับโครโมโซมก็จะสังเกตได้ง่ายขึ้น



ความรู้เพิ่มเติม

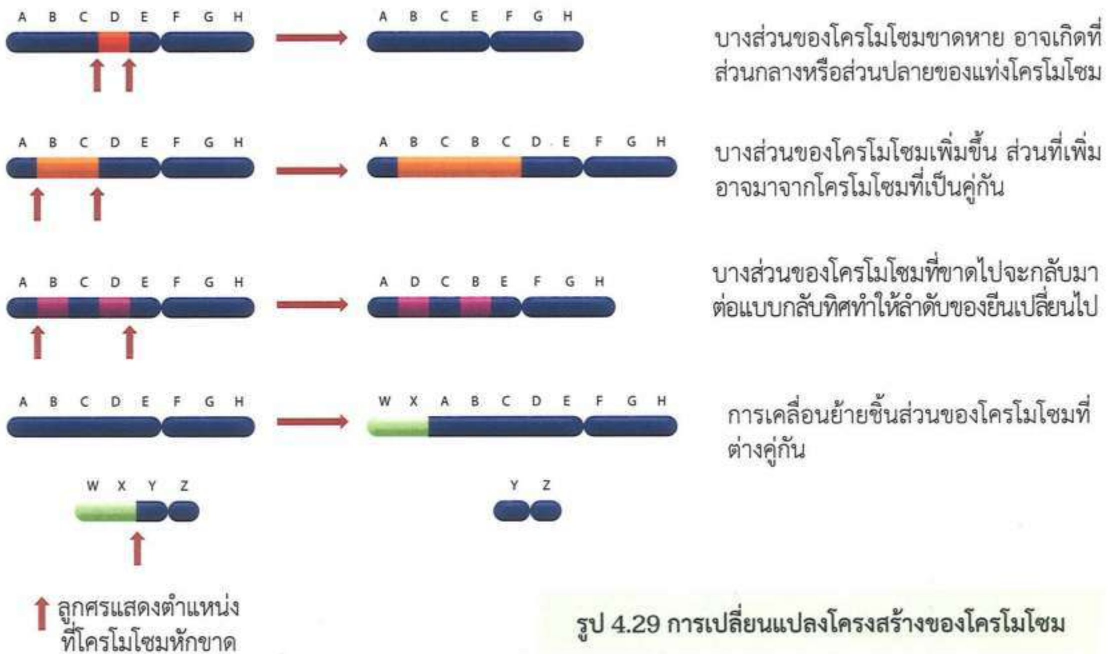
ความผิดปกติทางพันธุกรรมที่เกิดจากมิวเทชันระดับยีน เช่น

- ลักษณะเผือก ไม่สร้างเมลานิน ทำให้มีผิวขาว ผมขาว และม่านตาสีเทา
- ทาลัสซีเมีย มีอาการโลหิตจาง
- อะคอนโดรพลาเซีย (achondroplasia) ลักษณะแคระ แขนและขาสั้น

4.4.2 มิวเทชันระดับโครโมโซม

โดยทั่วไปเมื่อเซลล์มีการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส จะได้เซลล์ลูกที่มีจำนวนโครโมโซมเหมือนเซลล์แม่ทุกประการ การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสจะได้เซลล์ลูกที่มีจำนวนโครโมโซมเป็นครึ่งหนึ่งของเซลล์แม่ แต่ในบางครั้งอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ มิวเทชันระดับโครโมโซมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือจำนวนโครโมโซม เป็นสาเหตุของการเกิดความผิดปกติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ฟีโนไทป์เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด เช่น กลุ่มอาการดาวน์ กลุ่มอาการคริดูชา กลุ่มอาการเทิร์นเนอร์ และกลุ่มอาการไคลน์เฟลเทอร์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซม อาจเกิดได้จากหลายกรณี ดังรูป 4.29



รูป 4.29 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครโมโซม

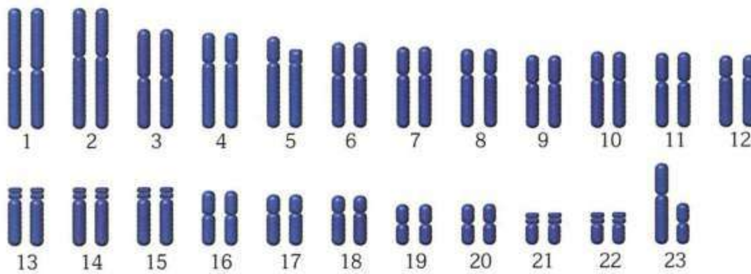
ในการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมที่เกิดขึ้นในรูป 4.29 จำนวนโครโมโซมยังคงเท่าเดิม แต่มีความผิดปกติจากการที่บางส่วนของโครโมโซมขาดหายไป บางส่วนของโครโมโซมเกินมาจากปกติ หรือการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของโครโมโซมที่ต่างคู่กัน ทำให้ขนาดของโครโมโซมเปลี่ยนแปลงไปจากปกติ ถ้าบางส่วนของโครโมโซมที่ขาดไปจะกลับมาต่อใหม่ แต่มีการเรียงตัวของยีนบนโครโมโซมสลับตำแหน่งกันหรือเปลี่ยนที่ไปจากเดิม ก็อาจทำให้ลักษณะของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไปได้

? การเปลี่ยนแปลงโครโมโซมแบบใดที่สังเกตความผิดปกติได้ยากภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เพราะเหตุใด

การจัดทำแคริโอไทป์ทำให้ทราบถึงความผิดปกติของโครโมโซมได้ ซึ่งเป็นการวินิจฉัยโรคพันธุกรรมที่เกิดจากความผิดปกติของโครโมโซมวิธีหนึ่ง เป็นความสำคัญของการศึกษาคาริโอไทป์ทางการแพทย์



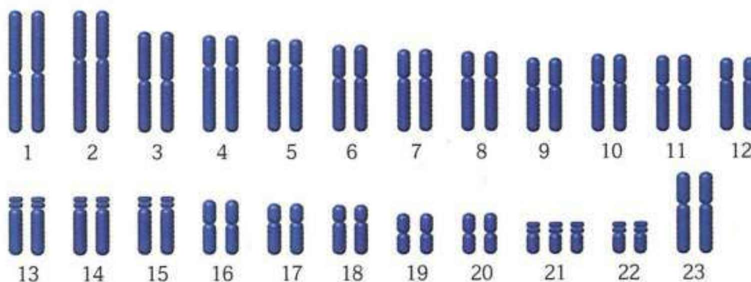
กรณีศึกษา แผนภาพโครโมโซมของกลุ่มอาการคริดูชา



1. กลุ่มอาการคริดูชาเกิดจากความผิดปกติของโครโมโซมคู่ใด และโครโมโซมนั้นมีความผิดปกติอย่างไร
2. จำนวนโครโมโซมมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
3. แผนภาพนี้เป็นของทารกเพศใด ทราบได้อย่างไร
4. จากการสืบค้นข้อมูล กลุ่มอาการคริดูชามีลักษณะความผิดปกติอย่างไร

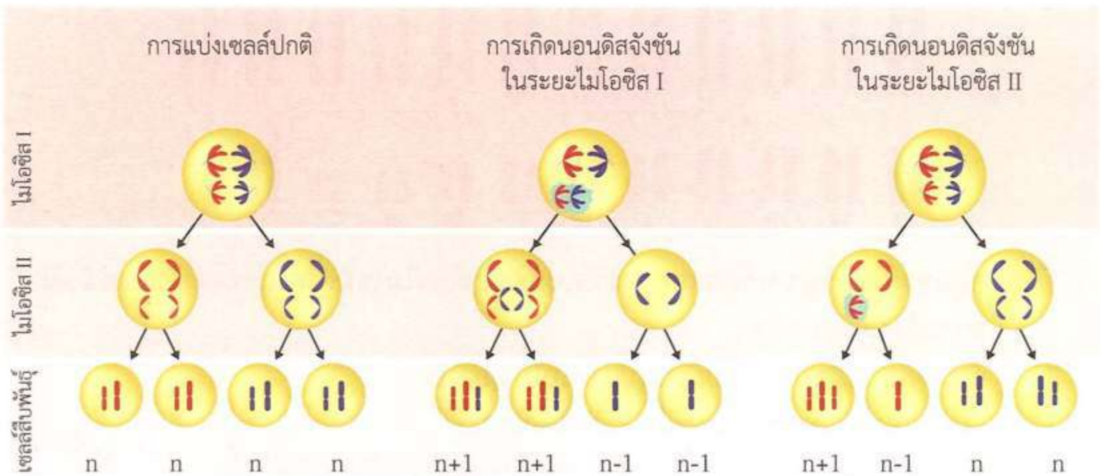


กรณีศึกษา แผนภาพโครโมโซมของกลุ่มอาการดาวน์



1. การเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมมีความผิดปกติอย่างไร
2. แผนภาพนี้เป็นของทารกเพศใด ทราบได้อย่างไร
3. จากการสืบค้นข้อมูล กลุ่มอาการดาวน์มีลักษณะความผิดปกติอย่างไร

การเปลี่ยนแปลงจำนวนโครโมโซมอาจเป็นผลจาก**การเกิดนอนดิสจังชัน** (nondisjunction) ซึ่งเป็นการที่ฮอมอโลกัสโครโมโซมไม่แยกจากกันในระยะแอนาเฟส I หรือการที่ซิสเตอร์โครมาทิดไม่แยกออกจากกันในระยะแอนาเฟส II ส่งผลให้จำนวนโครโมโซมในเซลล์ลูกที่ได้แตกต่างไปจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสตามปกติ เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้จึงมีจำนวนโครโมโซมน้อยหรือมากกว่าปกติ ดังรูป 4.30 เมื่อเซลล์สืบพันธุ์ที่ผิดปกตินี้ปฏิสนธิกับเซลล์สืบพันธุ์ปกติ จะได้ไซโกตซึ่งมีจำนวนโครโมโซมผิดปกติไปด้วย การเปลี่ยนแปลงจำนวนโครโมโซมเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ จำนวนเพิ่มขึ้นหรือลดลง พบได้ทั้งออโตโซมและโครโมโซมเพศ



รูป 4.30 การแบ่งเซลล์ปกติและการเกิดนอนดิสจังชันในระยะไมโอซิส I และไมโอซิส II

? การเกิดนอนดิสจังชันในระยะใดที่ลูกมีโอกาสมีความผิดปกติมากกว่า เพราะเหตุใด

? ถ้าสเปิร์มมีโครโมโซม XY ปฏิสนธิกับเซลล์ไข่ที่มีโครโมโซม X ลูกจะมีโครโมโซมเพศเป็นอย่างไร และเกิดเป็นเพศใด

? การเกิดนอนดิสจังชันสามารถเกิดขึ้นในการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิสได้หรือไม่ และจะส่งผลอย่างไร

สิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนชุดโครโมโซม 2 ชุดหรือดิพลอยด์ (2n) อาจมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนชุดโครโมโซมได้ สิ่งมีชีวิตที่มีจำนวนโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด เรียกว่า **พอลิพลอยด์** (polyploid) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสที่ผิดปกติจากปรากฏการณ์นอนดิสจังชัน ทำให้เซลล์สืบพันธุ์ที่ปกติจะต้องมีโครโมโซม 1 ชุดหรือแฮพลอยด์ (n) กลายเป็นมีโครโมโซม 2 ชุด

พอลิพลอยด์พบได้ทั้งในพืชและในสัตว์ แต่ส่วนใหญ่พบในพืชซึ่งทำให้พืชมีขนาดของดอกหรือผลใหญ่กว่าพวกดิพลอยด์ นอกจากนี้ยังมีผลผลิตหรือมีการสร้างสารบางอย่างเพิ่มขึ้น เช่น ข้าวโพดที่เป็น 4n มีวิตามินสูงกว่าข้าวโพดที่เป็น 2n พืชที่เป็นพอลิพลอยด์เลขคู่ เช่น 4n 6n และ 8n สามารถสืบพันธุ์และถ่ายทอดพันธุกรรมต่อไปได้ แต่พืชที่เป็นพอลิพลอยด์เลขคี่ เช่น 3n 5n และ 7n มักเป็นหมัน จึงนำมาพัฒนาสายพันธุ์เพื่อให้ได้พืชไร้เมล็ด เช่น แตงโม องุ่น



รู้หรือไม่

แตงโมไร้เมล็ดยังคงมีเมล็ด แต่เมล็ดส่วนใหญ่เป็นเมล็ดไม่สมบูรณ์มีสีขาวอ่อนนิ่ม และมีเมล็ดสีน้ำตาลจำนวนน้อยมากและขนาดเล็ก โดยทั่วไปแตงโมมีโครโมโซม 2 ชุด (2n) หรือ 22 แท่ง (1 ชุด = 11 แท่ง) การพัฒนาพันธุ์แตงโมไร้เมล็ดทำได้โดยใช้สารเคมีเพิ่มจำนวนโครโมโซมเป็น 2 เท่า (เททระพลอยด์, 4n) หลังจากนั้นจะนำต้น 4n ไปปลูกเป็นต้นแม่ และใช้เกสรเพศผู้จากต้น 2n มาผสม ลูกที่ได้จะมีโครโมโซม 3n และเป็นหมัน

 เพราะเหตุใดพืชที่เป็นพอลิพลอยด์เลขคี่จึงมักเป็นหมัน

พอลิพลอยด์ในสัตว์พบน้อยกว่าในพืช เช่น บางสายพันธุ์ของกบแอฟริกัน ปลาเรนโบว์เทราท์ ปลาคาร์พ และซาลามานเดอร์ สำหรับในมนุษย์นั้นการเปลี่ยนแปลงจำนวนโครโมโซมส่วนใหญ่เป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้อายุสั้น พิการทางร่างกายและสมอง ส่วนพอลิพลอยด์จะส่งผลกระทบที่รุนแรงทำให้เอ็มบริโอเสียชีวิตตั้งแต่อยู่ในครรภ์มารดา



กิจกรรมเสนอแนะ : กลุ่มอาการหรือโรคที่เกิดจากมิวเทชัน

จุดประสงค์

สืบค้นข้อมูลและยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม

วิธีการทำกิจกรรม

ให้นักเรียนสืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับกลุ่มอาการหรือโรคที่เกิดจากมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซมของมนุษย์ แล้วนำเสนอหน้าชั้นเรียนเกี่ยวกับชื่อของกลุ่มอาการหรือโรค ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับยีนและโครโมโซม และลักษณะของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต

มิวเทชันทำให้ลักษณะของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไป เพราะการทำให้เกิดมิวเทชันจะทำให้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลต่อการทำงานของโปรตีน ทำให้สามารถวิเคราะห์บทบาทหน้าที่ของโปรตีนชนิดนั้น ๆ ได้ ดังนั้นจึงมีการชักนำให้เกิดมิวเทชันเพื่อศึกษาการพัฒนาของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น ยีสต์ แมลงหวี่ และอะราบิดอพซิส และใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงพันธุ์พืช เช่น การฉายรังสีเพื่อปรับปรุงพันธุ์ทิวลิป ถั่วเหลือง ข้าวสาลี และมันเทศ

ถ้ามิวเทชันเกิดขึ้นในตำแหน่งที่สำคัญอาจส่งผลรุนแรงทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้าไม่อยู่ในตำแหน่งที่สำคัญก็จะสามารถอยู่รอดได้ บางครั้งการเกิดมิวเทชันอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมที่ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตดำรงชีวิตได้ดีกว่าเดิม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ DNA และโครโมโซม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้สิ่งมีชีวิตมีลักษณะแตกต่างกันออกไป แต่หากลักษณะเหล่านี้สามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้ มีผลทำให้เกิดการแปรผันทางพันธุกรรมสร้างความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตสปีชีส์นั้น ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งนำไปสู่การเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะได้ศึกษาในบทที่ 7 เรื่องวิวัฒนาการ



สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

1. DNA พันรอบกลุ่มฮิสโทน 8 โมเลกุลได้เป็นนิวคลีโอโซม และนิวคลีโอโซมม้วนพันกันเป็นโครมาทิน โครมาทินมีการขดตัวทำให้หนาขึ้นและสั้นลงมองเห็นเป็นโครโมโซม

2. การจำแนกโครโมโซมสามารถทำได้โดยใช้ขนาดโครโมโซมและตำแหน่งเซนโทรเมียร์

3. นักวิทยาศาสตร์ใช้วิธีการทางวิทยาศาสตร์ และใช้ข้อมูลที่มีการค้นพบแล้วของนักวิทยาศาสตร์คนอื่น ๆ เป็นข้อมูลในการทำการทดลองต่อไปจนสรุปได้ว่า DNA เป็นสารพันธุกรรม

4. DNA ประกอบด้วยพอลินิวคลีโอไทด์ 2 สาย แต่ละนิวคลีโอไทด์ประกอบด้วยส่วนย่อย 3 ส่วน ได้แก่ น้ำตาลดีออกซีไรโบส ไนโตรจีนัสเบส และหมู่ฟอสเฟต

5. ยีน คือ ช่วงของ DNA ที่ทำหน้าที่กำหนดลักษณะทางพันธุกรรม เมื่อ DNA ขดตัวเป็นโครโมโซม ยีนจึงเป็นส่วนหนึ่งของโครโมโซมด้วย

6. สารพันธุกรรมสามารถเพิ่มจำนวนได้และมีลักษณะเหมือนเดิมโดยการจำลอง DNA สามารถควบคุมให้เซลล์สังเคราะห์สารต่าง ๆ โดยการสังเคราะห์โปรตีน และสารพันธุกรรมอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้างหากเกิดมิวเทชัน

7. การจำลองดีเอ็นเอเป็นการจำลองแบบกึ่งอนุรักษ์ มีการเพิ่มโมเลกุลของ DNA จาก 1 โมเลกุล เป็น 2 โมเลกุล แต่ละโมเลกุลมีพอลินิวคลีโอไทด์สายเดิม 1 สาย และสายใหม่ 1 สาย

8. การสังเคราะห์โปรตีน มีกระบวนการถอดรหัสโดยใช้ DNA เป็นแม่แบบ ได้เป็น mRNA ที่จะถูกนำไปใช้ในการแปลรหัสได้เป็นกรดแอมิโนที่ต่อกันเป็นพอลิเพปไทด์

9. RNA ที่สำคัญสำหรับใช้ในการแปลรหัส คือ
   - mRNA ทำหน้าที่นำรหัสการสังเคราะห์โปรตีนจาก DNA ไปยังไรโบโซม
   - tRNA ทำหน้าที่นำกรดแอมิโนที่จำเพาะกับรหัสพันธุกรรมบนสาย mRNA มาต่อเป็นสายพอลิเพปไทด์
   - rRNA เป็นองค์ประกอบของไรโบโซม ซึ่งเป็นออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีน

10. รหัสพันธุกรรมที่ควบคุมลำดับกรดแอมิโน ประกอบด้วย 3 นิวคลีโอไทด์เรียงต่อกัน เรียกว่า โคดอน

11. การสังเคราะห์โปรตีนในโพรแคริโอตสามารถเกิดขึ้นได้ โดยที่ mRNA ที่สังเคราะห์มาจาก DNA จะถูกนำไปแปลรหัสทันทีทั้งที่กระบวนการถอดรหัสยังไม่สิ้นสุดลง ส่วนการสังเคราะห์โปรตีนในยูแคริโอตจะมีความซับซ้อนกว่า กระบวนการถอดรหัสเกิดภายในนิวเคลียส จากนั้น mRNA จะออกจากนิวเคลียสไปยังไซโทพลาซึมแล้วจึงมีการแปลรหัสเกิดขึ้น

12. มิวเทชันเกิดจากยีนที่ควบคุมลักษณะนั้นมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลให้ลักษณะปรากฏหรือฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนไป การเกิดมิวเทชันแบ่งออกเป็นมิวเทชันระดับยีนและมิวเทชันระดับโครโมโซม

13. มิวทาเจนสามารถกระตุ้นหรือชักนำให้เกิดมิวเทชันในอัตราที่สูงขึ้นได้

14. มิวเทชันระดับยีนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงชนิดและจำนวนนิวคลีโอไทด์บนสาย DNA ในบริเวณที่เป็นยีน มี 2 แบบ คือ มิวเทชันแบบการแทนที่คู่เบสซึ่งอาจมีหรือไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการทำงานของพอลิเพปไทด์และผลต่อฟีโนไทป์ และมิวเทชันแบบการเพิ่มขึ้นหรือขาดหายของนิวคลีโอไทด์ซึ่งมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการทำงานของพอลิเพปไทด์และมีผลต่อฟีโนไทป์

15. มิวเทชันระดับโครโมโซมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือจำนวนโครโมโซม ส่งผลให้ฟีโนไทป์เปลี่ยนแปลงไป

16. ลักษณะที่เกิดจากมิวเทชันระดับยีน เช่น ลักษณะเผือก ทาลัสซีเมีย อะคอนโดรพลาเซีย

17. ลักษณะที่เกิดจากมิวเทชันระดับโครโมโซม เช่น กลุ่มอาการดาวน์ กลุ่มอาการคริดูชา กลุ่มอาการเทิร์นเนอร์ และกลุ่มอาการไคลน์เฟลเทอร์



แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

1. จงใส่เครื่องหมายถูก (√) หน้าข้อความที่ถูกต้อง ใส่เครื่องหมายผิด (×) หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง และขีดเส้นใต้เฉพาะคำหรือส่วนของข้อความที่ไม่ถูกต้อง และแก้ไขโดยตัดออกหรือเติมคำหรือข้อความที่ถูกต้องลงในช่องว่าง

.... 1.1 เมื่อนำสารที่สกัดจากแบคทีเรีย *Streptococcus pneumoniae* สายพันธุ์ก่อโรคที่ทำให้ตายด้วยความร้อนมาเติมเอนไซม์ DNase และ RNase นำสารที่ได้ไปใส่ในอาหารที่เลี้ยงแบคทีเรียสายพันธุ์ไม่ก่อโรค แบคทีเรียจะไม่สามารถก่อโรคได้

....

.... 1.2 โปรตีนฮิสโทนในโครโมโซมประกอบด้วยกรดแอมิโนซึ่งส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ทำให้สามารถเกาะจับกับสาย DNA ได้ดี

....

.... 1.3 จำนวนยีน ขนาดเซลล์ และขนาดของสิ่งมีชีวิตไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กับขนาดของจีโนมของสิ่งมีชีวิตนั้น

....

.... 1.4 DNA เป็นสายพอลินิวคลีโอไทด์ที่มีปลาย 2 ด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่าปลาย 5′ และอีกด้านหนึ่งเรียกว่าปลาย 3′ โดยที่ปลายด้าน 3′ นี้จะมีหมู่ฟอสเฟตเชื่อมอยู่กับน้ำตาลดีออกซีไรโบสที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3

....

.... 1.5 ปริมาณเบสในโมเลกุล DNA สายคู่สายหนึ่ง จะมีอัตราส่วนของ A + G ต่อ T + C มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

....

.... 1.6 สิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์จะมีจำนวนนิวคลีโอไทด์และการจัดเรียงลำดับของนิวคลีโอไทด์ในโมเลกุล DNA แตกต่างกัน

....

.... 1.7 สิ่งมีชีวิตสามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้สาเหตุหนึ่งมาจากการที่สารพันธุกรรมมีสมบัติในการเพิ่มจำนวนตัวเองได้โดยมีลักษณะเหมือนเดิม

....

.... 1.8 ในการจำลองดีเอ็นเอ โดยเริ่มต้นจาก DNA 1 โมเลกุล เมื่อผ่านการจำลองไป 3 รอบ จะได้ DNA ใหม่ 7 โมเลกุล และเป็น DNA ตั้งต้น 1 โมเลกุล

....

.... 1.9 ในการสังเคราะห์สาย DNA จะสร้างในทิศทางจากปลาย 5′ ไป 3′ ของ DNA สายใหม่ โดยเบสของ DNA สายใหม่จะต้องเป็นเบสคู่สมของ DNA สายเดิม และปริมาณเบส A ใน DNA สายใหม่จะต้องเท่ากับใน DNA สายที่ใช้เป็นแม่แบบ

....

.... 1.10 การสังเคราะห์สาย DNA จะใช้เอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสเชื่อมนิวคลีโอไทด์ให้ต่อกันเป็นสายยาวจากปลาย 5′ ไป 3′ ของ DNA สายใหม่ ส่วนการสังเคราะห์สาย mRNA จะใช้สาย DNA เป็นต้นแบบ และใช้เอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลิเมอเรสเชื่อมนิวคลีโอไทด์ให้ต่อกันเป็นสายยาวจากปลาย 3′ ไป 5′

....

.... 1.11 ในการสังเคราะห์โปรตีนจะแปลรหัสบนสาย mRNA จากปลาย 5′ ไป 3′ โดยกรดแอมิโนเมไทโอนีนจะแปลจากรหัสซึ่งมีลำดับเบสบนสาย mRNA เป็น AUG ซึ่งจะจับกับ tRNA ที่มีลำดับเบสบริเวณรหัส 5′ UAC 3′

....

.... 1.12 ในสิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอตการแปลรหัสจากข้อมูลทางพันธุกรรมเป็นโปรตีนเกิดขึ้นในไซโทพลาซึม โดยมี mRNA เป็นตัวกลางในการนำข้อมูลจาก DNA ในนิวเคลียส

....

.... 1.13 การเกิดมิวเทชันระดับยีนไม่สามารถทำให้เกิดการกลายแบบที่ทำให้สายพอลิเพปไทด์สั้นลงได้

....

.... 1.14 การแบ่งเซลล์สืบพันธุ์ซึ่งเกิดนอนดิสจังชันของฮอมอโลกัสโครโมโซมในไมโอซิส I จะได้จำนวนเซลล์สืบพันธุ์ที่ปกติมากกว่าที่ได้จากการแบ่งเซลล์สืบพันธุ์ซึ่งเกิดนอนดิสจังชันของฮอมอโลกัสโครโมโซมในไมโอซิส II

....

2. ถ้าสิ่งมีชีวิตสปีชีส์หนึ่งมีสารพันธุกรรมเป็น DNA สายคู่ และมีปริมาณของเบส A เป็นร้อยละ 20 ของปริมาณเบสใน DNA ทั้งหมด จงหาปริมาณร้อยละของเบส T C และ G

3. จงเติมข้อมูลลงในช่องว่างของตารางแสดงการสังเคราะห์โปรตีนบนส่วนหนึ่งของยีน *A* ให้สมบูรณ์

ตารางแสดงการสังเคราะห์โปรตีนบนส่วนหนึ่งของยีน A														
ลำดับนิวคลีโอไทด์บนสาย DNA	ปลาย ...′	TAC	CGG			AGT	.......A		C		TGA		.......G	ปลาย ...′
ลำดับนิวคลีโอไทด์บนสาย mRNA	ปลาย ...′	AUG		GGC	.......U			AGU		C		AGU		ปลาย ...′
ลำดับกรดแอมิโน	ปลาย N	Met			Pro		Leu		Thr	Phe			Asp	ปลาย C

4. จากลำดับนิวคลีโอไทด์ต่อไปนี้

3′ G C T A C A C G C C T A T A G C G G T G C G G T T C T G A A T 5′

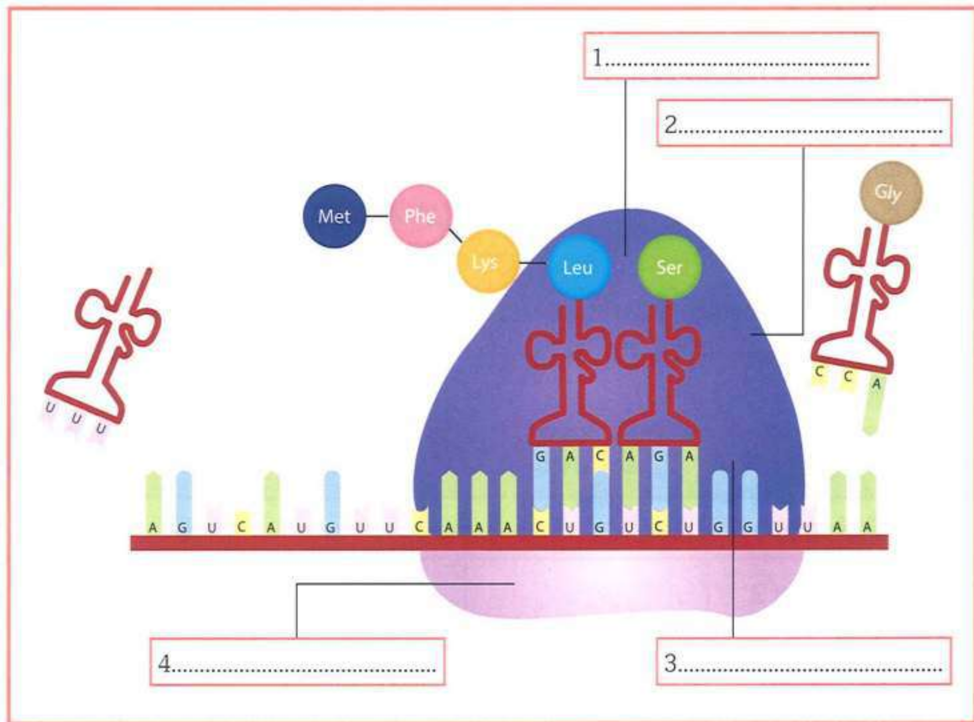
4.1 เมื่อผ่านกระบวนการถอดรหัส mRNA ที่ได้จะมีลำดับนิวคลีโอไทด์อย่างไร

4.2 ถ้ากระบวนการแปลรหัสเริ่มที่รหัสพันธุกรรมของเมไทโอนีนตัวแรกในสาย mRNA สายพอลิเพปไทด์ที่ได้จะมีลำดับอย่างไร

4.3 ถ้า DNA เกิดมิวเทชันทำให้คู่เบสที่ตำแหน่งที่ 18 หายไป (นับจากปลาย 5′) สายพอลิเพปไทด์ที่ได้จะมีลำดับอย่างไร

4.4 ถ้า DNA เกิดมิวเทชันทำให้คู่เบสที่ตำแหน่งที่ 23 (นับจากปลาย 5′) เปลี่ยนเป็น T สายพอลิเพปไทด์ที่ได้จะมีลำดับอย่างไร

5. ภาพแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์โปรตีนในแบคทีเรีย



ถ้าแบคทีเรียได้รับยาปฏิชีวนะชนิดต่าง ๆ จะยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน ให้เติมชื่อยาปฏิชีวนะลงในช่องว่างให้สัมพันธ์กับขั้นตอนยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนของแบคทีเรียในลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

- Chloramphenicol จับกับไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดใหญ่และยับยั้งการสร้างพันธะเพปไทด์
- Streptomycin เปลี่ยนแปลงรูปร่างของไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดเล็ก ส่งผลให้อ่านโคดอนของ mRNA ผิด
- Tetracycline รบกวนการจับกันระหว่าง mRNA และ tRNA
- Erythromycin จับกับไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดใหญ่ทำให้ไรโบโซมไม่เคลื่อนที่

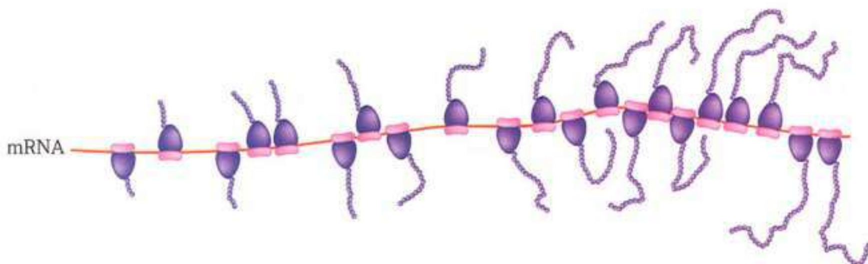
6. ลำดับนิวคลีโอไทด์ของ mRNA ของสายพันธุ์ปกติและพันธุ์กลาย (mutant) ของสิ่งมีชีวิตเป็นดังนี้

สายพันธุ์ปกติ: mRNA	5' ...UCC CUG ACC CAG CGA AAC CCU... 3'
สายพันธุ์ปกติ: พอลิเพปไทด์	Ser - Leu - Thr - Gln - Arg - Asn - Pro
พันธุ์กลาย 1:	5' ... UCC CUG ACC UAG CGA AAC CCU ... 3'
พันธุ์กลาย 2:	5' ... UCC CUG ACC CAG CUA AAC CCU ... 3'
พันธุ์กลาย 3:	5' ... UCC CUA ACC CAG CGA AAC CCU ... 3'
พันธุ์กลาย 4:	5' ... UCC CUG ACC CCA GCG AAA CCC ... 3'

จงระบุว่าพันธุ์กลายเกิดมิวเทชันอย่างไร ทำให้เกิดผลอย่างไร และลำดับกรดแอมิโนบนสายพอลิเพปไทด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลำดับอย่างไร

	มิวเทชัน	ผลที่เกิดขึ้น	ลำดับกรดแอมิโน
พันธุ์กลาย 1			
พันธุ์กลาย 2			
พันธุ์กลาย 3			
พันธุ์กลาย 4			

7. พอลิโซมที่เกิดในภาพเป็นการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์โพรแคริโอตหรือเซลล์ยูแคริโอต อธิบายเหตุผลประกอบ และการแปลรหัสนี้เกิดขึ้นที่ส่วนใดของเซลล์



บทที่ 5 | การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม


goo.gl/MvxnvS

มนุษย์มีลักษณะทางพันธุกรรมที่หลากหลาย ซึ่งได้รับถ่ายทอดมาจากพ่อและแม่ ทั้งสีตา ลักษณะเส้นผม และสีผิว รวมทั้งอาจมีลักษณะที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากภายนอกซึ่งถูกถ่ายทอดมาด้วย เช่น หมู่เลือด และลักษณะตาบอดสี อย่างไรก็ตาม พี่และน้องในครอบครัวเดียวกันมีลักษณะบางอย่างที่แตกต่างกันและแตกต่างจากพ่อแม่ **ลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตถ่ายทอดจากบรรพบุรุษไปสู่ลูกหลานได้อย่างไร**



คำถามสำคัญ

1. **ยีนที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมมีการถ่ายทอดจากรุ่นสู่รุ่นได้อย่างไร**
2. **เพราะเหตุใดลักษณะทางพันธุกรรมในรุ่นลูกจึงอาจแตกต่างกัน**
3. **เมื่อทราบลักษณะของพ่อแม่จะสามารถทำนายลักษณะทางพันธุกรรมของลูกที่จะเกิดขึ้นได้หรือไม่อย่างไร**



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปผลการทดลองของเมนเดล
2. อธิบายความหมาย และยกตัวอย่าง ลักษณะเด่น ลักษณะด้อย แอลลีล ฟีโนไทป์ จีโนไทป์ ฮอมอไซกัส เฮเทอโรไซกัส ฮอมอไซกัสโดมิแนนท์ และฮอมอไซกัสรีเซสสีฟ
3. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีล โปรตีน และลักษณะทางพันธุกรรม
4. อธิบาย และสรุปกฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ
5. นำกฎการแยก และกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระไปอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม และใช้ในการคำนวณโอกาสในการเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบต่าง ๆ ของรุ่น F_1 และ F_2
6. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบความเด่นไม่สมบูรณ์ ความเด่นร่วม มัลติเพิลแอลลีล และลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่
7. นำความรู้ไปใช้ในการหาโอกาสเกิดลักษณะที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล
8. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่องและลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง
9. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม และยกตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซมและยีนบนโครโมโซมเพศ
10. อธิบายการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเดียวกัน และการเกิดครอสซิงโอเวอร์ในการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส



ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (√) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

1. ลักษณะการห่อลิ้น ความสูง และโรคทาลัสซีเมีย ควบคุมโดยพันธุกรรม
2. ลูกจะมีลักษณะทางพันธุกรรมครึ่งหนึ่งเหมือนพ่อและอีกครึ่งหนึ่งเหมือนแม่ เพราะได้รับการถ่ายทอดโครโมโซมชุดหนึ่งจากพ่อและอีกชุดหนึ่งจากแม่
3. “โครโมโซม ยีน DNA นิวคลีโอไทด์” เป็นการเรียงลำดับจากใหญ่ไปเล็ก
4. ลักษณะเด่นจะพบในประชากรของสิ่งมีชีวิตมากกว่าลักษณะด้อย
5. แอลลีล คือ รูปแบบของยีนที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์แตกต่างกัน
6. ถ้าพ่อมีลักยิ้มและแม่ไม่มีลักยิ้ม ลูกทุกคนในครอบครัวจะมีลักยิ้ม
7. การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสเพื่อสร้างอสุจิของมนุษย์ ได้เซลล์ลูก 4 เซลล์ แต่ละเซลล์มีจำนวนโครโมโซม 46 แท่ง
8. สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะเด่นจะมีความแข็งแรงมากกว่าสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะด้อย
9. เมื่อเกิดมิวเทชันอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของโปรตีน ซึ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดในเซลล์สืบพันธุ์จะสามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้
10. ลูกชายจะมีลักษณะทางพันธุกรรมเหมือนกับพ่อมากกว่าแม่

สมบัติหนึ่งที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต คือ มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมต่าง ๆ จากรุ่นสู่รุ่น **การศึกษาทางวิทยาศาสตร์เพื่ออธิบายเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมทำได้อย่างไร**

5.1 การศึกษาพันธุกรรมของเมนเดล

เกรกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel; พ.ศ. 2365-2427) ได้ทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อศึกษารูปแบบการถ่ายทอดลักษณะของต้นถั่วลันเตา และสรุปเป็นหลักการในการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นสู่รุ่น ซึ่งในขณะนั้นยังไม่มีการค้นพบโครโมโซม DNA หรือยีน อย่างไรก็ตามหลักการที่เมนเดลค้นพบนับเป็นพื้นฐานในการอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตที่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศทั้งพืชและสัตว์ เมนเดลจึงได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาแห่งพันธุศาสตร์

เมนเดลศึกษากระบวนการถ่ายทอดลักษณะโดยทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) ซึ่งมีลักษณะที่เหมาะสมต่อการศึกษาหลายประการ เช่น มีวัฏจักรชีวิตสั้น ปลูกง่าย มีลักษณะหลากหลาย ให้ลูกจำนวนมาก รวมทั้งสามารถควบคุมการผสมพันธุ์ได้ ดอกถั่วลันเตาเป็นดอกสมบูรณ์เพศที่มีกลีบดอกปิดคลุมกลุ่มเกสรเพศผู้และเกสรเพศเมียป้องกันไม่ให้เรณูจากดอกอื่นผสมกับเซลล์ไข่ได้ ในธรรมชาติจึงมี**การปฏิสนธิตัวเอง** (self-fertilization) ในการทดลองเมนเดลได้ตัดเกสรเพศผู้ทิ้งให้เหลือเฉพาะเกสรเพศเมีย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผสมภายในดอกเดียวกัน แล้วนำเรณูจากอับเรณูของดอกจากอีกต้นหนึ่งมาป้ายที่ยอดเกสรเพศเมียของดอกนั้น เรียกวิธีผสมแบบนี้ว่า**การปฏิสนธิข้าม** (cross-fertilization) เพื่อให้ได้รุ่นลูกที่เกิดจากต้นพ่อและต้นแม่ที่ต้องการศึกษา ดังรูป 5.1

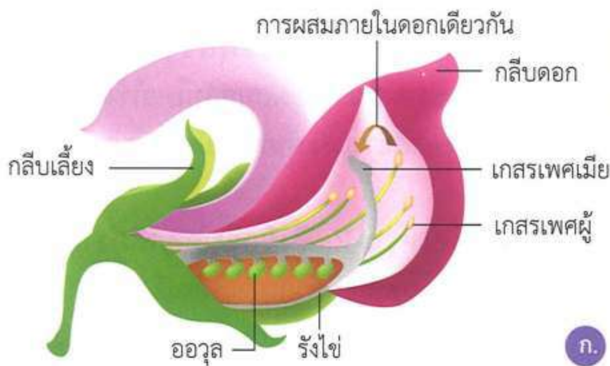


ความรู้เพิ่มเติม



เกรกอร์ เมนเดล เป็นชาวออสเตรีย ศึกษาและบวชที่โบสถ์แห่งหนึ่งในกรุงบรึนน์ (BrÜnn) ปัจจุบันคือเมืองเบรอโน (Brno) ในสาธารณรัฐเช็ก ต่อมาศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยเวียนนาซึ่งได้เรียนรู้ทั้งทางด้าน พฤกษศาสตร์ คณิตศาสตร์ เคมี และฟิสิกส์ ภายหลังเมนเดลกลับมาเป็นครูและได้ดัดแปลงที่ดินในโบสถ์ให้เป็นแปลงเพื่อทดลองด้านพฤกษศาสตร์ควบคู่ไปด้วย ในปี พ.ศ. 2408 เมนเดลได้นำเสนองานวิจัย และตีพิมพ์ในปีถัดมา แต่ผลงานของเขาเริ่มได้รับการยอมรับในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ในช่วงปี พ.ศ. 2443 หลังจากที่เมนเดลเสียชีวิตแล้ว

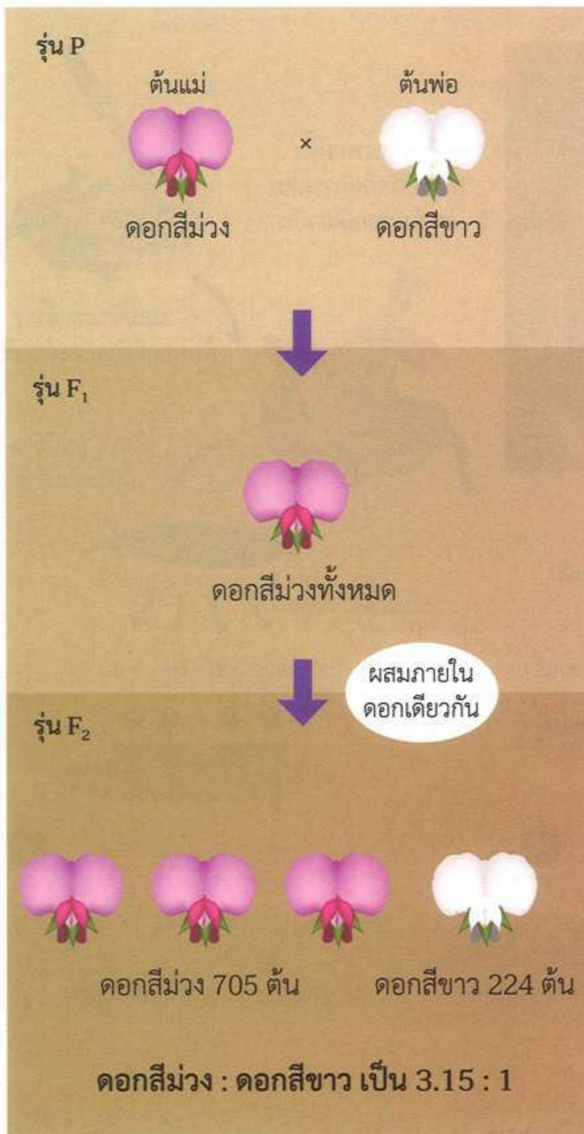






รูป 5.1 การทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตา
ก. โครงสร้างของดอกถั่วลันเตา ข. การผสมข้ามระหว่างถั่วลันเตา

เมนเดลได้ทำการทดลองและคัดเลือก**ลักษณะ** (trait) ของถั่วลันเตา 7 ลักษณะ ได้แก่ สีของกลีบดอก ความสูงของลำต้น รูปร่างของฝัก รูปร่างของเมล็ด สีของเมล็ด ตำแหน่งของดอก และสีของฝัก ซึ่งแต่ละลักษณะมีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น กลีบดอกสีม่วงและกลีบดอกสีขาว เมนเดลทำการทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยพิจารณาทีละลักษณะ เรียกว่า **การผสมลักษณะเดียว** (monohybrid cross) และวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะของรุ่นลูกรุ่นหลานที่เกิดขึ้น ดังตัวอย่างการศึกษาลักษณะสีของกลีบดอก ดังรูป 5.2



รูป 5.2 การผสมถั่วลันเตาดอกสีม่วงและดอกสีขาว

- ทำการผสมภายในดอกเดียวกันหลาย ๆ รุ่น จนแน่ใจว่าได้ต้นที่เป็น**สายพันธุ์แท้** (true-breeding line หรือ pure line) ของลักษณะนั้น แล้วนำต้นแม่ที่มีดอกสีม่วงพันธุ์แท้และต้นพ่อที่มีดอกสีขาวพันธุ์แท้มาผสมกัน เรียกรุ่นนี้ว่า **รุ่นพ่อแม่** หรือ **รุ่น P** (parental generation)

- จากการผสมพันธุ์ในรุ่น P จะได้เมล็ดซึ่งนำไปปลูกได้เป็นต้นใหม่จำนวนมาก เรียกลูกผสมรุ่นนี้ว่า **รุ่น F_1** (first filial generation) ซึ่งพบว่ารุ่น F_1 มีดอกสีม่วงทั้งหมด แม้ว่าจะผสมสลับโดยใช้ต้นแม่ที่มีดอกสีขาวและต้นพ่อที่มีดอกสีม่วงก็ตาม

- เมื่อให้รุ่น F_1 ซึ่งมีกลีบดอกสีม่วงผสมภายในดอกเดียวกัน จะได้เมล็ดซึ่งไปปลูกได้เป็นต้นใหม่จำนวนมาก เรียกรุ่นนี้ว่า **รุ่น F_2** (second filial generation) ซึ่งพบว่ารุ่น F_2 มีทั้งต้นที่มีดอกสีม่วงและต้นที่มีดอกสีขาว โดยมีอัตราส่วนระหว่างต้นที่มีดอกสีม่วงต่อต้นที่มีดอกสีขาวเป็น 3 : 1 โดยประมาณ และเมื่อผสมสลับลักษณะในรุ่น P ยังคงพบว่าลักษณะในรุ่น F_2 เป็นเช่นเดิม

? เพราะเหตุใดถั่วลันเตาในรุ่น F_1 จึงไม่ปรากฏต้นที่มีดอกสีขาว

? เพราะเหตุใดลักษณะที่ปรากฏในรุ่น F_2 จึงแตกต่างจากลักษณะที่ปรากฏในรุ่น F_1

นอกจากนี้ จากผลการทดลองการผสมพันธุ์ลักษณะอื่น ๆ ของถั่วลันเตา ต้นถั่วในรุ่น F_2 ล้วนมีอัตราส่วนเป็น 3 : 1 โดยประมาณ ดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 ผลการทดลองการผสมพันธุ์ถั่วลันเตา 7 ลักษณะ

ลักษณะในรุ่นพ่อแม่	ลักษณะในรุ่น F_1	ลักษณะและจำนวนในรุ่น F_2	
		จำนวนต้นหรือเมล็ด	อัตราส่วน
ดอกสีม่วง (*PP*) × ดอกสีขาว (*pp*)	ดอกสีม่วง (*Pp*)	705 ดอกสีม่วง 224 ดอกสีขาว	3.15 : 1
ต้นสูง (*TT*) × ต้นเตี้ย (*tt*)	ต้นสูง (*Tt*)	787 ต้นสูง 277 ต้นเตี้ย	2.84 : 1
ดอกตามซอก (*AA*) × ดอกตามยอด (*aa*)	ดอกตามซอก (*Aa*)	651 ดอกตามซอก 207 ดอกตามยอด	3.14 : 1
เมล็ดสีเหลือง (*YY*) × เมล็ดสีเขียว (*yy*)	เมล็ดสีเหลือง (*Yy*)	6,022 เมล็ดสีเหลือง 2,001 เมล็ดสีเขียว	3.01 : 1
เมล็ดกลม (*RR*) × เมล็ดขรุขระ (*rr*)	เมล็ดกลม (*Rr*)	5,474 เมล็ดกลม 1,850 เมล็ดขรุขระ	2.96 : 1
ฝักสีเขียว (*GG*) × ฝักสีเหลือง (*gg*)	ฝักสีเขียว (*Gg*)	428 ฝักสีเขียว 152 ฝักสีเหลือง	2.82 : 1
ฝักอวบ (*II*) × ฝักแฟบ (*ii*)	ฝักอวบ (*Ii*)	882 ฝักอวบ 299 ฝักแฟบ	2.95 : 1

ถึงแม้ในรุ่น F_1 จะไม่แสดงลักษณะดอกสีขาวเหมือนในรุ่น P แต่มีการถ่ายทอดหน่วยควบคุมลักษณะจากรุ่น P ไปยังรุ่น F_2 ทำให้ปรากฏต้นที่มีดอกสีขาวในรุ่น F_2 จากผลการทดลอง เมนเดลได้สรุปว่าลักษณะต่าง ๆ ของถั่วลันเตามีหน่วยที่ควบคุมลักษณะเหล่านั้นและถ่ายทอดได้ เรียกว่า แฟกเตอร์ (factor) ซึ่งแฟกเตอร์ของแต่ละลักษณะจะอยู่เป็นคู่ ภายหลังนักวิทยาศาสตร์เรียกแฟกเตอร์ว่า **ยีน** (gene) โดยยีนที่ควบคุมลักษณะหนึ่ง ๆ มีรูปแบบที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ เรียกรูปแบบที่แตกต่างกันว่า **แอลลีล** (allele) ยกตัวอย่างเช่น ยีนควบคุมสีกลีบดอก มีแอลลีลควบคุมลักษณะกลีบดอกสีม่วง และแอลลีลควบคุมลักษณะกลีบดอกสีขาว ทั้งนี้ลักษณะที่ปรากฏในรุ่น F_1 ของการศึกษาเป็น**ลักษณะเด่น** (dominant trait) และลักษณะที่ไม่ปรากฏในรุ่น F_1 แต่ปรากฏในรุ่น F_2 เป็น**ลักษณะด้อย** (recessive trait)

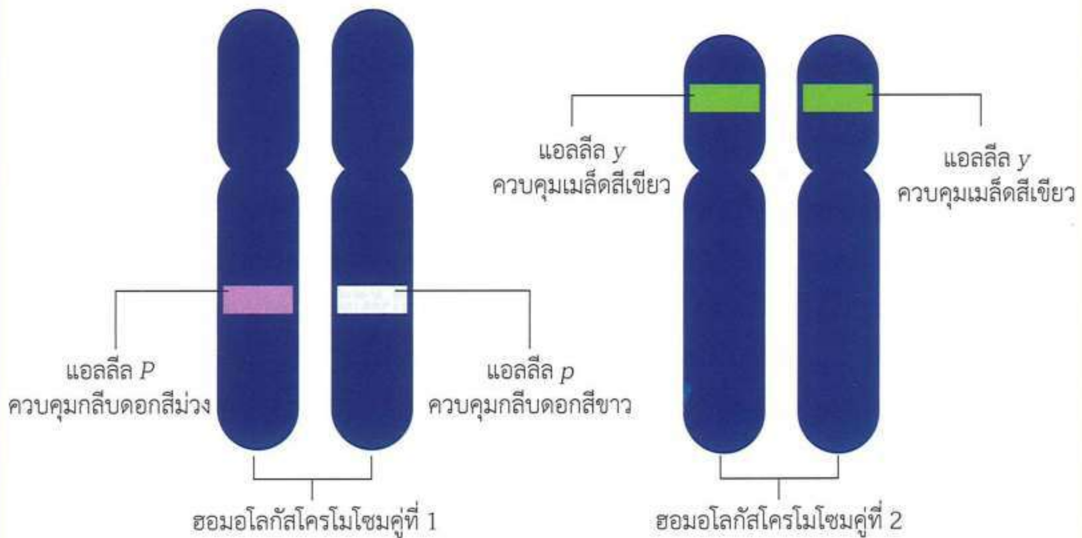
ลักษณะที่ปรากฏของสิ่งมีชีวิต เช่น ความสูงของต้นถั่ว เรียกว่า **ฟีโนไทป์** (phenotype) ซึ่งถูกกำหนดโดยองค์ประกอบทางพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยองค์ประกอบทางพันธุกรรมที่ประกอบด้วยรูปแบบต่าง ๆ ของคู่ของแอลลีล เรียกว่า **จีโนไทป์** (genotype) ทั้งนี้ฟีโนไทป์อาจเป็นลักษณะปรากฏที่สังเกตได้จากภายนอก เช่น สีตา หรือเป็นลักษณะที่สามารถตรวจสอบได้ เช่น หมู่เลือด หรือระดับของเอนไซม์ที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อนักวิทยาศาสตร์ศึกษาต่อมาและมีการค้นพบโครโมโซมจึงอธิบายได้ว่า ในสิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์ หรือมีโครโมโซม 2 ชุดในเซลล์ร่างกายจะมีโครโมโซมที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นคู่ ๆ เรียกว่า ฮอมอโลกัสโครโมโซม ยีนที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมแต่ละลักษณะจะมีคู่ของแอลลีลอยู่ที่ตำแหน่งหรือ**โลคัส** (locus) เดียวกันบนฮอมอโลกัสโครโมโซม ซึ่งแต่ละแอลลีลของยีนบนโลคัสเดียวกันของฮอมอโลกัสโครโมโซมจะมีรูปแบบที่เหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ ในกรณีของสีกลีบดอกถั่วลันเตามี**แอลลีลเด่น** (dominant allele) ควบคุมลักษณะกลีบดอกสีม่วง และ**แอลลีลด้อย** (recessive allele) ควบคุมลักษณะกลีบดอกสีขาว โดยที่ฮอมอโลกัสโครโมโซมคู่อื่นจะมียีนที่ควบคุมลักษณะอื่น ๆ เช่น สีของเมล็ด ดังรูป 5.3



ความรู้เพิ่มเติม

ในการพิจารณาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม สัญลักษณ์แทนแอลลีลไม่ได้มีการกำหนดแบบตายตัว โดยอาจใช้ตัวอักษรแรกของลักษณะในภาษาอังกฤษ และพิมพ์เป็นตัวเอน อักษรตัวพิมพ์ใหญ่แทนแอลลีลเด่น เช่น *T* แทนแอลลีลควบคุมลักษณะต้นสูง (Tall) และอักษรตัวพิมพ์เล็กแทนแอลลีลด้อย เช่น *t* แทนแอลลีลควบคุมลักษณะต้นเตี้ย หรืออาจใช้เครื่องหมายบวก แทนแอลลีลเด่น เช่น w^+



รูป 5.3 โลคัสของยีนบนฮอมอโลกัสโครโมโซม

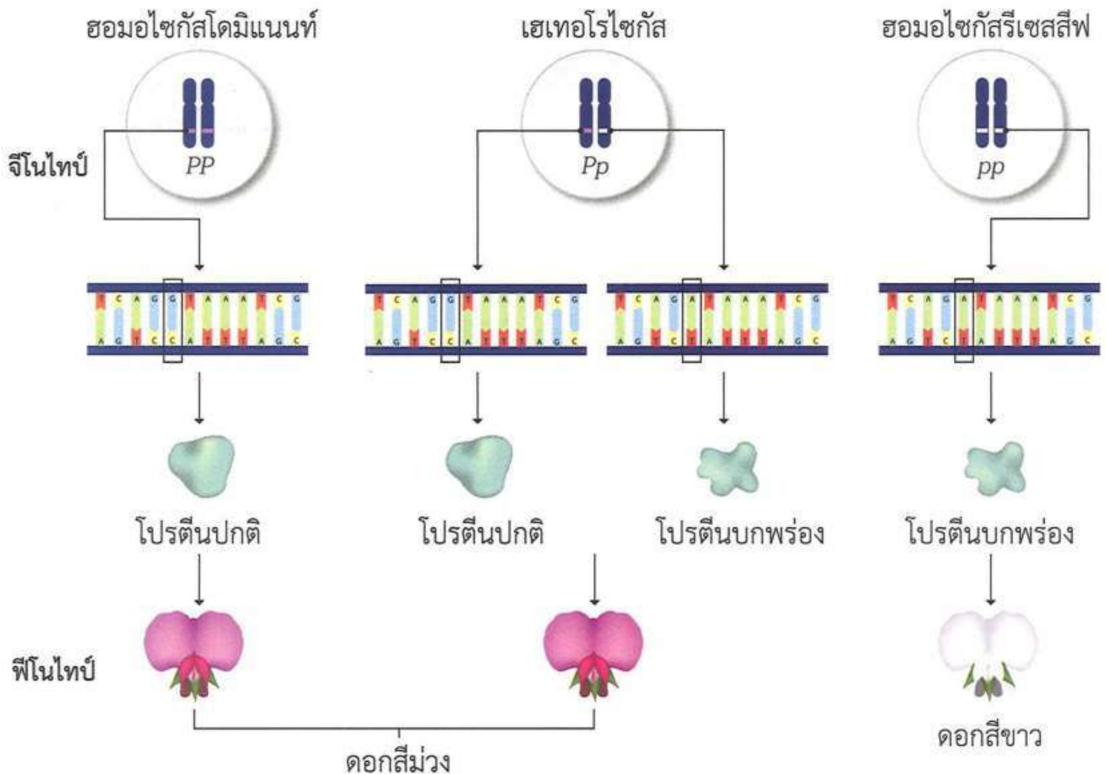
ในการอธิบายการถ่ายทอดลักษณะสีดอกของถั่วลันเตา ถ้ากำหนดให้ *P* แทนแอลลีลเด่นที่ควบคุมกลีบดอกสีม่วง และ *p* แทนแอลลีลด้อยที่ควบคุมกลีบดอกสีขาว สามารถเขียนจีโนไทป์ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ *PP Pp* และ *pp* โดยต้นถั่วลันเตาที่มีจีโนไทป์เป็น *PP* และ *Pp* จะแสดงฟีโนไทป์เป็นลักษณะดอกสีม่วง ส่วนต้นถั่วลันเตาที่มีจีโนไทป์เป็น *pp* แสดงฟีโนไทป์เป็นลักษณะดอกสีขาว

สภาพที่จีโนไทป์มีแอลลีลรูปแบบเดียวกัน เรียกว่า จีโนไทป์แบบ**ฮอมอไซกัส** (homozygous)

- เมื่อมีแอลลีลเด่นทั้งหมด (*PP*) เรียกว่า**ฮอมอไซกัสโดมิแนนท์** (homozygous dominant)
- เมื่อมีแอลลีลด้อยทั้งหมด (*pp*) เรียกว่า**ฮอมอไซกัสรีเซสสีฟ** (homozygous recessive)

ส่วนจีโนไทป์ที่มีแอลลีลรูปแบบแตกต่างกัน (*Pp*) เรียกว่า จีโนไทป์แบบ**เฮเทอโรไซกัส** (heterozygous)

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ใช้ความรู้ทางด้านพันธุศาสตร์ระดับโมเลกุลอธิบายการแสดงออกของยีน ดังที่ทราบมาแล้วว่า แอลลีลของยีนหนึ่ง ๆ ที่แตกต่างกันจะมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้มีการสร้างโปรตีนที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ทำให้มีฟีโนไทป์แตกต่างกัน ในลักษณะสีกลีบดอก แอลลีล *P* ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารสีแอนโทไซยานิน ทำให้เกิดกลีบดอกสีม่วง ส่วนแอลลีล *p* มีลำดับนิวคลีโอไทด์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้โปรตีนนี้เปลี่ยนแปลงไป จึงไม่สามารถสร้างสารสีแอนโทไซยานินได้ ดังนั้นต้นที่มีจีโนไทป์เป็น *PP* และ *Pp* จึงมีกลีบดอกสีม่วง ส่วนต้นที่มีจีโนไทป์เป็น *pp* จึงมีกลีบดอกสีขาว ดังรูป 5.4



รูป 5.4 จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของสีกลีบดอกของถั่วลันเตา

นอกจากที่เมนเดลได้เสนอเกี่ยวกับหน่วยควบคุมลักษณะทางพันธุกรรม จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเมนเดลได้เสนอหลักการพื้นฐานของพันธุศาสตร์ 2 ข้อ คือ กฎการแยก และกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ เพื่ออธิบายกระบวนการถ่ายทอดหน่วยควบคุมลักษณะจากรุ่นสู่รุ่น โดยอาศัยความน่าจะเป็นทางคณิตศาสตร์มาใช้ประกอบการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง



ความรู้เพิ่มเติม

ความน่าจะเป็น (probability) คือ อัตราส่วนของจำนวนผลลัพธ์ของเหตุการณ์ต่อจำนวนผลลัพธ์ทั้งหมดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เมื่อแต่ละผลลัพธ์ที่อาจจะเกิดขึ้นมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่า ๆ กัน โดยความน่าจะเป็นมีโอกาสอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ตัวอย่างเช่น การโยนเหรียญ 1 เหรียญ จำนวน 1 ครั้ง มีโอกาสที่ออกหัวและก้อยได้เท่ากันดังนั้นโอกาสที่จะออกเป็นหัวคือ ½ และโอกาสที่จะออกเป็นก้อยคือ ½ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์มากกว่า 2 เหตุการณ์ขึ้นไป สามารถหาได้ดังนี้

หลักการคูณ ใช้กับเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เป็นอิสระต่อกัน สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของแต่ละเหตุการณ์ ตัวอย่างเช่น ถ้าครอบครัวหนึ่งวางแผนจะมีลูก 2 คน โอกาสที่ครอบครัวนี้มีลูกคนที่หนึ่ง **และ** คนที่สองเป็นเพศชายเป็นเท่าใด

โอกาสที่ลูกคนที่หนึ่งเป็นเพศชาย = $\frac{1}{2}$

โอกาสที่ลูกคนที่สองเป็นเพศชาย = $\frac{1}{2}$

ดังนั้น โอกาสที่ลูกทั้งสองคนจะเป็นเพศชาย = $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

หลักการบวก ใช้กับเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่หนึ่งหรือเหตุการณ์ที่สองจะเท่ากับผลบวกของโอกาสที่เกิดขึ้นของแต่ละเหตุการณ์ ตัวอย่างเช่น เมื่อโยนลูกเต๋า 1 ครั้ง โอกาสที่จะได้เลข 1 **หรือ** ได้เลข 4 เป็นเท่าใด

โอกาสที่โยนลูกเต๋าได้เลข 1 = $\frac{1}{6}$

โอกาสที่โยนลูกเต๋าได้เลข 4 = $\frac{1}{6}$

ดังนั้น โอกาสที่โยนลูกเต๋าได้เลข 1 หรือเลข 4 = $\frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{2}{6}$

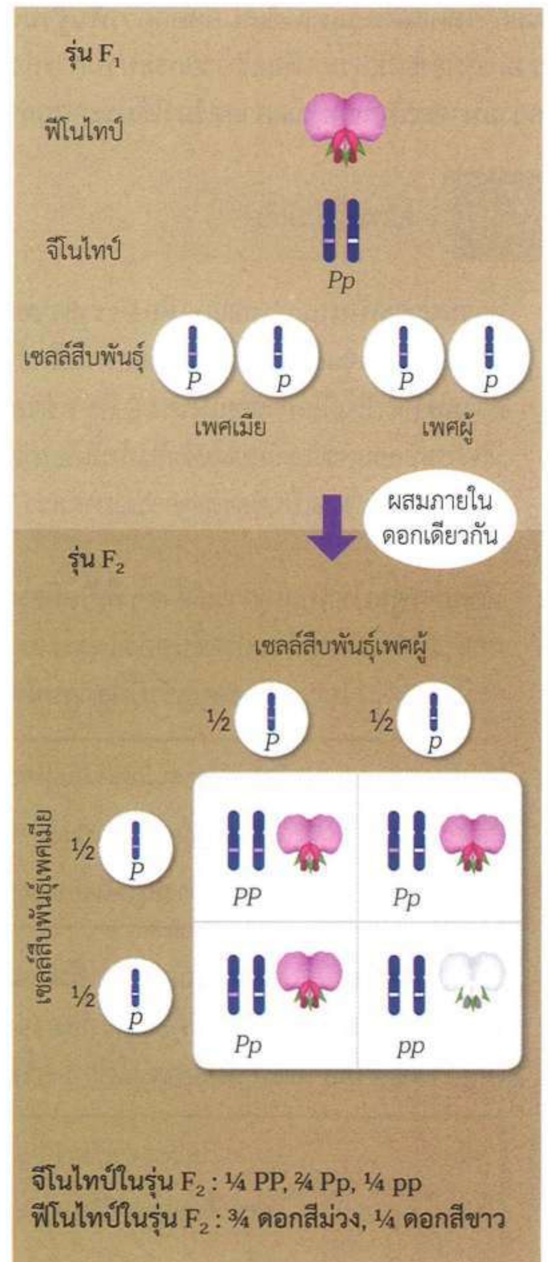
? ให้นักเรียนยกตัวอย่างเหตุการณ์ที่สามารถใช้ความน่าจะเป็นในการอธิบายมาอย่างน้อย 2 เหตุการณ์

5.1.1 กฎการแยก

จากที่เมนเดลศึกษาการถ่ายทอดลักษณะของถั่วลันเตาทั้ง 7 ลักษณะ โดยพิจารณาทีละลักษณะ และได้ศึกษาซ้ำจำนวนหลายชุดจนได้รุ่น F_2 เป็นจำนวนหลายพันต้น และพบว่าอัตราส่วนระหว่างลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อยของรุ่น F_2 เท่ากับ 3 : 1 โดยประมาณ ได้ข้อสรุปเป็น**กฎการแยก** (law of segregation) ซึ่งมีใจความว่า **แอลลีลที่อยู่เป็นคู่กันจะแยกออกจากกันในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ โดยเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะมีเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่ง** เมื่อมีการปฏิสนธิจะเกิดการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์ แอลลีลจะมาเข้าคู่กัน

ในการศึกษาต่อมาพบว่ายีนอยู่บนโครโมโซม และสามารถอธิบายได้ว่า ในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์จะมีการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส แอลลีลที่อยู่เป็นคู่กันบนคู่ของฮอมอโลกัสโครโมโซมจะแยก (segregate) ออกจากกัน โดยเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะได้รับโครโมโซมเพียงชุดเดียวทำให้เซลล์ไข่หรือสเปิร์มได้รับแอลลีลเพียงหนึ่งแอลลีล

ยกตัวอย่างเช่น ต้นถั่วลันเตาในรุ่น F_1 ที่มีจีโนไทป์ *Pp* จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 2 รูปแบบ โดยมีโอกาสเป็น *P* เท่ากับ ½ และมีโอกาสเป็น *p* เท่ากับ ½ เมื่อมีการผสมระหว่างรุ่น F_1 ด้วยกันเอง และเกิดการปฏิสนธิ รุ่น F_2 จะมีโอกาสมีจีโนไทป์เป็น *PP* : *Pp* : *pp* ในอัตราส่วน 1 : 2 : 1 และมีฟีโนไทป์เป็นดอกสีม่วง : ดอกสีขาว ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังรูป 5.5



รูป 5.5 การผสมลักษณะเดียวของลักษณะสีกลีบดอกในถั่วลันเตา



ความรู้เพิ่มเติม

ตารางพันเนตต์ (Punnett square) คิดค้นโดยเรจินัลด์ พันเนตต์ (Reginald Punnett) สามารถใช้ตารางพันเนตต์หาผลลัพธ์ของโอกาสการเข้าคู่กันของแอลลีลในขณะเกิดการปฏิสนธิ

เซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ (แนวนอน) / เซลล์สืบพันธุ์เพศเมีย (แนวตั้ง)

	T	*T*
T	*TT*	*TT*
t	*Tt*	*Tt*

ความน่าจะเป็นของจีโนไทป์ในรุ่นลูก

? ถ้าผสมพันธุ์ถั่วลันเตาต้นพ่อที่มีเมล็ดรูปร่างกลมและมีจีโนไทป์ *Rr* กับถั่วลันเตาต้นแม่ที่มีเมล็ดรูปร่างขรุขระ และมีจีโนไทป์ *rr* จะมีโอกาสสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง และรุ่นลูกมีโอกาสมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์กี่แบบ อะไรบ้าง และมีอัตราส่วนเป็นเท่าใด

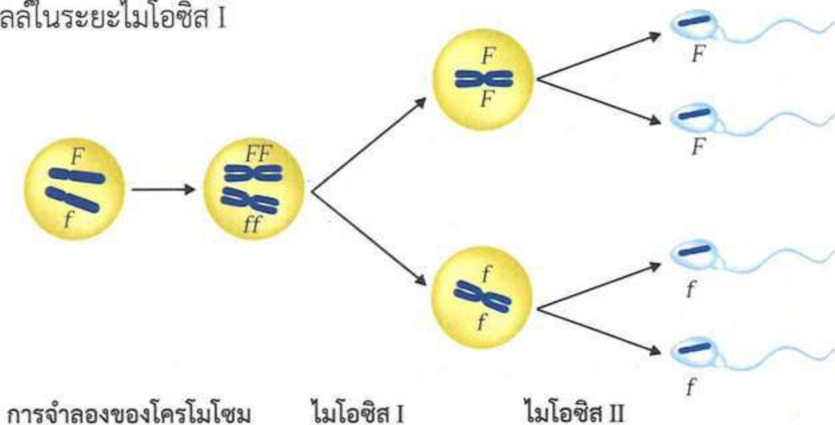
? ถ้านำถั่วลันเตากลีบดอกสีม่วงที่มีจีโนไทป์เป็น *Pp* มาผสมพันธุ์กันเอง การเข้าคู่กันของแอลลีลเป็นไปตามหลักความน่าจะเป็นอย่างไร



การเชื่อมโยงความรู้

กฎการแยกสัมพันธ์กับระยะใดของการแบ่งเซลล์

ในการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ เมื่อเซลล์มีการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส คู่ของฮอมอโลกัสโครโมโซมจะแยกจากกันในระยะไมโอซิส I และซิสเตอร์โครมาทิดจะแยกออกจากกันในระยะไมโอซิส II ได้เป็นเซลล์สืบพันธุ์ ดังนั้นเหตุการณ์ที่เมนเดลเสนอไว้ในกฎแห่งการแยกจึงสัมพันธ์กับการแบ่งเซลล์ในระยะไมโอซิส I





กิจกรรม 5.1 การแก้โจทย์ปัญหา เรื่องการผสมลักษณะเดียว

จุดประสงค์

1. เขียนจีโนไทป์และฟีโนไทป์จากสถานการณ์ที่กำหนดให้
2. หาอัตราส่วนของจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของรุ่น F_1 และ F_2 จากสถานการณ์ที่กำหนดให้

วิธีการทำกิจกรรม

ตอบคำถามจากโจทย์ปัญหาต่อไปนี้

1. จงเติมจีโนไทป์ สภาพของจีโนไทป์ แบบของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์ และโอกาสของการเกิดเซลล์สืบพันธุ์แต่ละแบบ ลงในตารางต่อไปนี้ให้สมบูรณ์

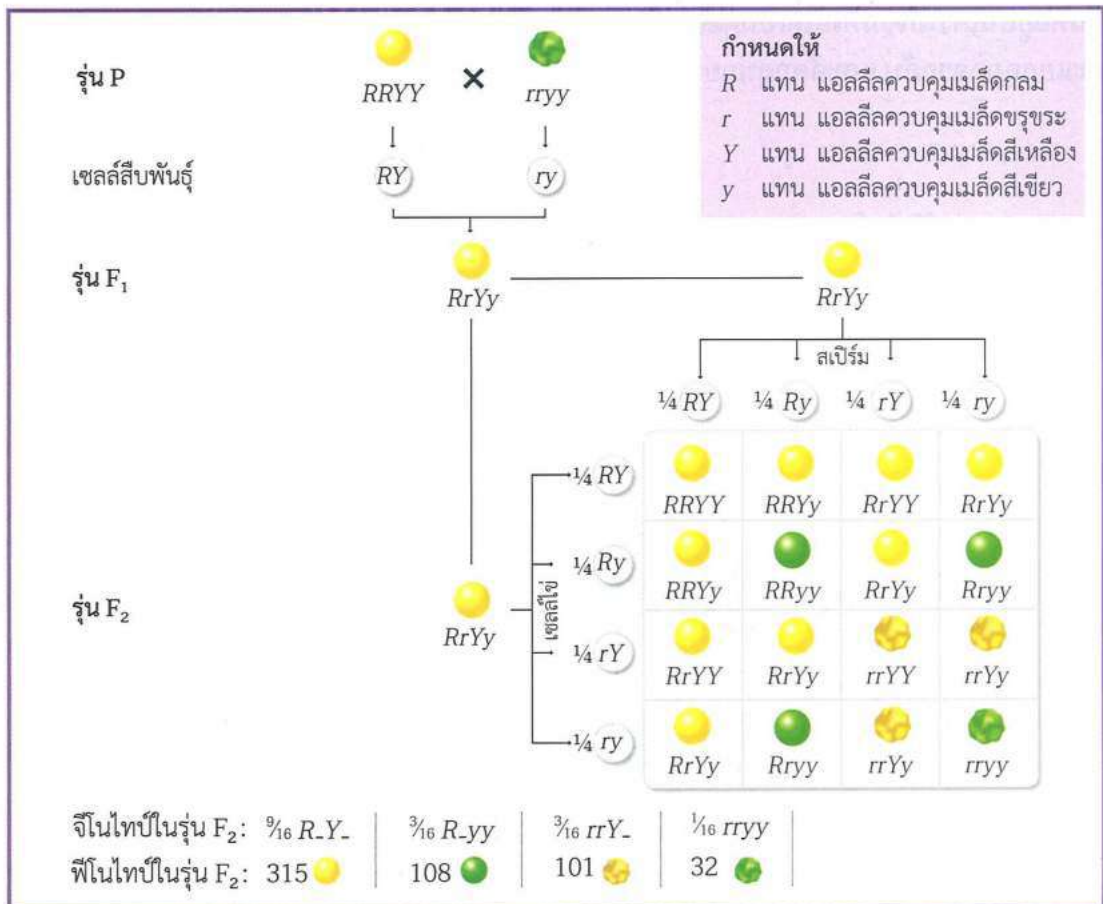
จีโนไทป์	สภาพของจีโนไทป์	แบบของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์และโอกาสของการเกิด
WW		
	เฮเทอโรไซกัส	*W* (½) และ *w* (½)
Tt		
aa		*a* (1)

2. ถั่วลันเตาลักษณะเมล็ดสีเหลืองเป็นลักษณะเด่นต่อลักษณะเมล็ดสีเขียว ในการผสมพันธุ์ภายในดอกเดียวกันของต้นที่มีลักษณะเมล็ดสีเหลืองที่เป็นเฮเทอโรไซกัส จงหาร้อยละของรุ่น F_1 ที่มีลักษณะเมล็ดสีเขียว
3. ในแมลงหวี่ กำหนดให้ *L* แทนแอลลีลควบคุมลักษณะปีกยาว และ *l* แทนแอลลีนควบคุมลักษณะปีกสั้น เมื่อผสมพันธุ์แมลงหวี่ปีกยาวและปีกสั้น จะได้ลูกที่มีปีกยาวและลูกที่มีปีกสั้นในอัตราส่วน 1 : 1 จงหาจีโนไทป์ของพ่อแม่และลูก
4. ถ้า *B* แทนแอลลีลที่ควบคุมลักษณะลำต้นมีขนในพืชชนิดหนึ่ง และ *b* แทนแอลลีลที่ควบคุมลักษณะลำต้นไม่มีขน ในการผสมพันธุ์ต้นที่มีลำต้นมีขนคู่หนึ่ง ปรากฏว่ารุ่นลูกจำนวน 123 ต้น มีลำต้นมีขนจำนวน 90 ต้น และมีลำต้นไม่มีขนจำนวน 33 ต้น
   4.1 ข้อมูลนี้บอกอะไรแก่เราบ้าง
   4.2 จงเขียนจีโนไทป์ของพืชในรุ่นพ่อแม่
   4.3 เมื่อนำต้นไม่มีขนในรุ่นลูกผสมพันธุ์กับต้นมีขนในรุ่นพ่อแม่จะได้ลูกมีลักษณะเป็นอย่างไร คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด

5.1.2 กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

การศึกษาตามที่กล่าวมาแล้วเป็นการพิจารณาเพียงลักษณะเดียว แต่เมนเดลได้ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของถั่วลันเตาโดยพิจารณาการถ่ายทอดสองลักษณะพร้อม ๆ กัน เรียกว่า **การผสมสองลักษณะ** (dihybrid cross) เช่น ลักษณะรูปร่างของเมล็ดและลักษณะสีของเมล็ด **ลักษณะทั้งสองลักษณะมีการถ่ายทอดไปด้วยกันจากรุ่นสู่รุ่นหรือไม่**

เมื่อผสมพันธุ์ถั่วลันเตาเมล็ดกลมสีเหลือง *(RRYY)* ที่เป็นลักษณะเด่นทั้งสองลักษณะกับถั่วลันเตาเมล็ดขรุขระสีเขียว *(rryy)* ที่เป็นลักษณะด้อยทั้งสองลักษณะ ต้นแม่จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ *RY* และต้นพ่อจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ *ry* เมื่อปฏิสนธิจะได้รุ่น F_1 เป็นเมล็ดกลมสีเหลืองทั้งหมด *(RrYy)* และเมื่อรุ่น F_1 ผสมกันเองจะได้ รุ่น F_2 เป็นเมล็ดกลมสีเหลือง : เมล็ดกลมสีเขียว : เมล็ดขรุขระสีเหลือง : เมล็ดขรุขระสีเขียวเท่ากับ 9 : 3 : 3 : 1 โดยประมาณ ดังรูป 5.6



รูป 5.6 การผสมสองลักษณะของรูปร่างเมล็ดและสีเมล็ดของถั่วลันเตา

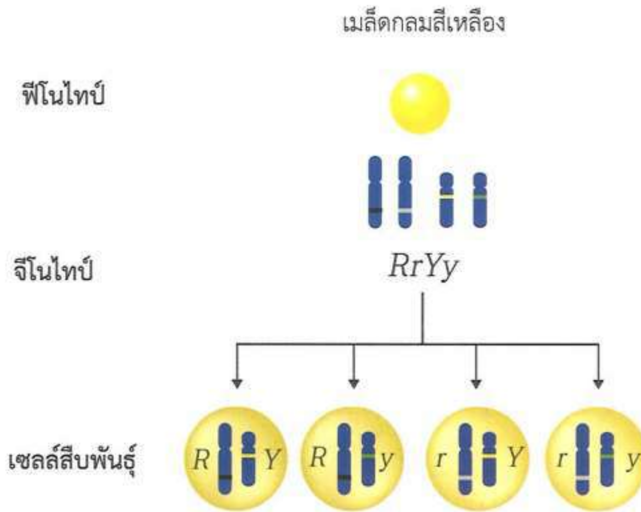
? รุ่น F_1 มีโอกาสสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง และรูปแบบของยีนในเซลล์สืบพันธุ์เป็นไปตามกฎการแยกหรือไม่

? ในรุ่น F_1 ที่มีจีโนไทป์เป็น *RrYy* โอกาสที่ *R* และ *Y* อยู่ในเซลล์สืบพันธุ์เดียวกัน จะเท่ากับโอกาสที่ *R* และ *y* อยู่ในเซลล์สืบพันธุ์เดียวกันหรือไม่

? รุ่น F_2 ที่มีฟีโนไทป์เหมือนต้นพ่อหรือต้นแม่ในรุ่น P มีอัตราส่วนเป็นเท่าใด

? อัตราส่วนฟีโนไทป์ในรุ่น F_2 ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับกฎความน่าจะเป็นหรือไม่ อย่างไร

เมื่อพิจารณาพร้อมกันทั้งสองลักษณะอัตราส่วนของฟีโนไทป์รุ่น F_2 เป็น 9 : 3 : 3 : 1 จะเกิดขึ้นได้เมื่อยีนที่ควบคุมลักษณะรูปร่างเมล็ดและยีนควบคุมลักษณะสีเมล็ดสามารถแยกออกจากกันเพื่อเข้าสู่เซลล์สืบพันธุ์และรวมกลุ่มกันได้อย่างอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับ **กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ** (law of independent assortment) ที่สรุปใจความได้ว่า **ในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ยีนที่อยู่บนโครโมโซมที่ไม่ได้เป็นคู่ฮอมอโลกัสกันจะมีการจัดกลุ่มอย่างอิสระ โดยแอลลีลที่เป็นคู่กันจะแยกออกจากกัน และจัดกลุ่มอย่างอิสระกับแอลลีลอื่นที่แยกออกมาจากคู่เช่นกัน** ดังรูป 5.7



รูป 5.7 การจัดกลุ่มอย่างอิสระของแอลลีลในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์

จะเห็นได้ว่าต้นถั่วลันเตาที่มีจีโนไทป์ *RrYy* จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้ 4 ชนิด คือ *RY Ry rY* และ *ry* ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 : 1 เมื่อเซลล์สืบพันธุ์ 4 ชนิดของทั้งพ่อและแม่มาปฏิสนธิกัน รุ่น F_2 จะมีฟีโนไทป์ในอัตราส่วน 9 : 3 : 3 : 1 ซึ่งเป็นไปตามหลักการคูณของความน่าจะเป็น แสดงได้ดังนี้

โอกาสที่จะเกิดเมล็ดกลมสีเหลือง คือ ผลคูณระหว่างโอกาสการเกิดเมล็ดกลม (¾) กับโอกาสการเกิดเมล็ดสีเหลือง (¾) เป็น (¾ × ¾) = 9/16

โอกาสที่จะเกิดเมล็ดกลมสีเขียว คือ (¾ × ¼) = 3/16

โอกาสที่จะเกิดเมล็ดขรุขระสีเหลือง คือ (¼ × ¾) = 3/16

โอกาสที่จะเกิดเมล็ดขรุขระสีเขียว คือ (¼ × ¼) = 1/16

? ถ้ายีนสองยีนที่ต้องการศึกษาอยู่บนคู่ฮอมอโลกัสโครโมโซมเดียวกัน นักเรียนคิดว่าจะได้รุ่นลูกมีฟีโนไทป์อย่างไร และมีอัตราส่วนแตกต่างจากผลการทดลองของเมนเดลอย่างไร

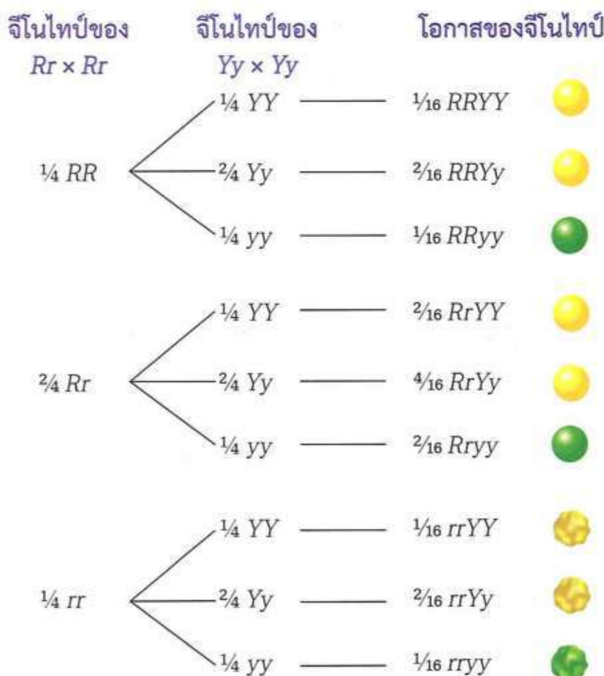
? กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระสัมพันธ์กับระยะใดในการแบ่งเซลล์เพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์

? นักเรียนคิดว่าเพราะเหตุใดการทดลองของเมนเดลจึงน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับจากนักวิทยาศาสตร์



ความรู้เพิ่มเติม

นอกจากการใช้ตารางพันเนตต์แล้ว สามารถใช้แผนภาพต้นไม้ (fork line หรือ branching method) เพื่อหาผลลัพธ์ของโอกาสการเข้าคู่กันของแอลลีลในขณะเกิดการปฏิสนธิได้



5.1.3 การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม

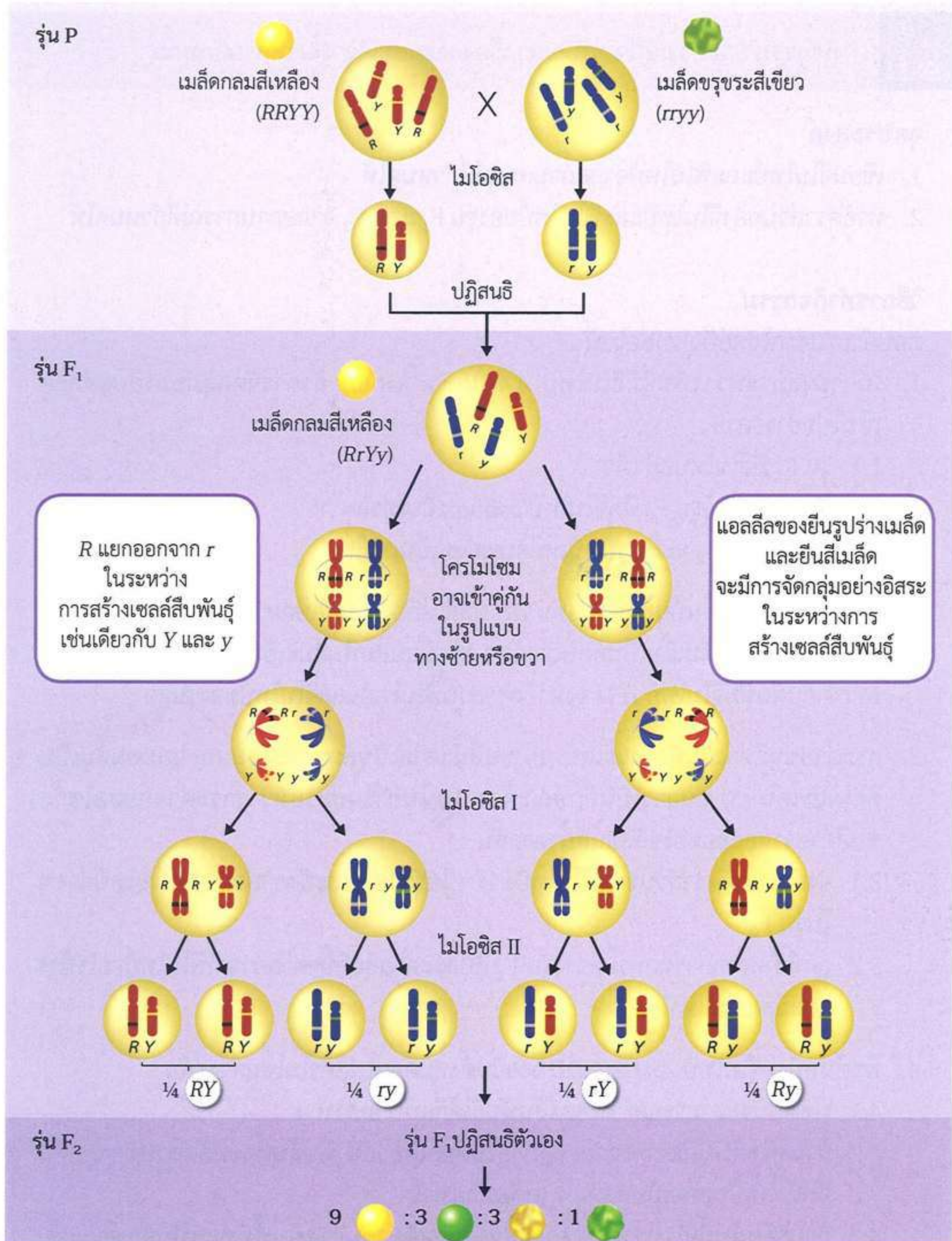
เมื่อมีการค้นพบโครโมโซม วอลเตอร์ ซัตตัน (Walter Sutton) ได้เสนอทฤษฎีโครโมโซมในการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมว่า ยีนที่ถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมนั้นเป็นส่วนหนึ่งของโครโมโซม เพราะมีเหตุการณ์หลายอย่างที่ยีนและโครโมโซมมีความสอดคล้องกัน ดังรูป 5.8

1. ยีนมี 2 ชุด และโครโมโซมมี 2 ชุด
2. ยีนและโครโมโซมสามารถถ่ายทอดไปสู่รุ่นลูกหลาน
3. ขณะที่มีการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส ฮอมอโลกัสโครโมโซมจะแยกจากกันไปยังเซลล์ลูกที่เกิดขึ้น ซึ่งการแยกลักษณะเดียวกันนี้ก็เกิดขึ้นกับยีน โดยมีการแยกตัวของแอลลีลทั้งสองไปยังเซลล์สืบพันธุ์
4. ขณะที่มีการแบ่งเซลล์นั้น ฮอมอโลกัสโครโมโซมแต่ละคู่จะแยกและมารวมกลุ่มกันที่ขั้วเซลล์อย่างอิสระ เช่นเดียวกับการแยกตัวของแอลลีลในแต่ละยีนจากต่างโครโมโซมที่ไปรวมกลุ่มกันภายในเซลล์สืบพันธุ์อย่างอิสระ
5. ในการปฏิสนธิ การรวมของเซลล์ไข่และสเปิร์มจะเป็นไปอย่างสุ่ม ทำให้การรวมกันระหว่างชุดโครโมโซมจากเซลล์ไข่และสเปิร์มเป็นไปอย่างสุ่มด้วย ซึ่งเหมือนกับการที่ชุดของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์ของแม่มารวมกับชุดของแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์ของพ่ออย่างสุ่มเช่นกัน ลักษณะทางพันธุกรรมในรุ่นลูกจึงแตกต่างกันไป
6. ไซโกตจะมีโครโมโซมครึ่งหนึ่งที่มาจากแม่และอีกครึ่งหนึ่งจากพ่อ ซึ่งยีนครึ่งหนึ่งก็มาจากแม่และอีกครึ่งหนึ่งก็มาจากพ่อเช่นกัน ทำให้ลูกที่เกิดมาอาจมีลักษณะแตกต่างไปจากพ่อและแม่



ตรวจสอบความเข้าใจ

? เขียนแผนภาพแสดงการแยกและการรวมตัวของยีนบนแท่งโครโมโซมในเซลล์สืบพันธุ์ในการผสมพันธุ์ระหว่าง *Aabb* กับ *aaBb* โดยวาดภาพโครโมโซม พร้อมระบุแอลลีลในเซลล์สืบพันธุ์



รูป 5.8 การแยกกันและการรวมกลุ่มอย่างอิสระของแอลลีลในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์



กิจกรรม 5.2 การแก้โจทย์ปัญหา เรื่องการผสมพิจารณาหลายลักษณะ

จุดประสงค์

1. เขียนจีโนไทป์และฟีโนไทป์จากสถานการณ์ที่กำหนดให้
2. หาอัตราส่วนของจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของรุ่น F_1 และ F_2 จากสถานการณ์ที่กำหนดให้

วิธีการทำกิจกรรม

ตอบคำถามจากโจทย์ปัญหาต่อไปนี้

1. ในการผสมระหว่างพืชที่มีจีโนไทป์ *AABBrr* × *aabbrr* ถ้าการจัดกลุ่มของยีนแต่ละคู่เป็นไปอย่างอิสระ
   1.1 รุ่น F_1 มีจีโนไทป์อย่างไร
   1.2 โอกาสที่จะได้รุ่น F_2 ที่มีจีโนไทป์ *aabbrr* เป็นเท่าใด
   1.3 โอกาสที่รุ่น F_2 จะมีจีโนไทป์เหมือนพ่อแม่เป็นเท่าใด

2. มะเขือเทศผลสีแดงเป็นลักษณะเด่น *(R)* ผลสีเหลืองเป็นลักษณะด้อย *(r)* และต้นสูงเป็นลักษณะเด่น *(T)* ต้นเตี้ยเป็นลักษณะด้อย *(t)* เมื่อผสมพันธุ์มะเขือเทศต้นหนึ่งมีจีโนไทป์ *RrTT* กับต้นที่มีจีโนไทป์ *rrTt* จงหาอัตราส่วนฟีโนไทป์และจีโนไทป์ของรุ่นลูก

3. กระต่ายขนสีดำเป็นลักษณะเด่น *(B)* ขนสีน้ำตาลเป็นลักษณะด้อย *(b)* และขนสั้นเป็นลักษณะเด่น *(S)* ขนยาวเป็นลักษณะด้อย *(s)* ในการผสมระหว่างกระต่ายฮอมอไซกัสขนสีดำยาวและฮอมอไซกัสขนสีน้ำตาลสั้น
   3.1 จงคำนวนอัตราส่วนของฟีโนไทป์ต่าง ๆ ในรุ่น F_1 และอัตราส่วนของฟีโนไทป์ต่าง ๆ ในรุ่น F_2
   3.2 ลูกที่เกิดจากการผสมระหว่างรุ่น F_1 กับกระต่ายขนสีน้ำตาลยาว มีฟีโนไทป์อะไรบ้างและมีสัดส่วนเท่าใด

4. พืชต้นหนึ่งมีจีโนไทป์ *AABbCcDD* โดยยีนทั้งหมดอยู่บนโครโมโซมต่างคู่กัน
   4.1 พืชต้นนี้จะสามารถสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง
   4.2 ถ้าให้พืชต้นนี้เกิดการถ่ายเรณูภายในดอกเดียวกัน พืชต้นนี้จะมีสัดส่วนของลูกที่มีจีโนไทป์เป็นฮอมอไซกัสทั้ง 4 โลคัสเป็นเท่าใด
   4.3 ถ้าให้พืชต้นนี้เกิดการถ่ายเรณูภายในดอกเดียวกันและยีนทั้งหมดเป็นลักษณะเด่นสมบูรณ์ จะได้ลูกที่มีฟีโนไทป์เป็นลักษณะเด่นทุกลักษณะในสัดส่วนเท่าใด



กิจกรรมเสนอแนะ : ความน่าจะเป็นกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม

จุดประสงค์

นำกฎการแยก กฎการร่วมกลุ่มอย่างอิสระ และหลักการความน่าจะเป็นมาใช้ในการหาโอกาสการเกิดลักษณะของลูกที่เกิดจากพ่อแม่ที่กำหนด

วัสดุและอุปกรณ์

1. ถุงผ้า จำนวน 4 ใบ ที่มีสีแตกต่างกัน
2. ลูกปัดลักษณะและขนาดเดียวกัน 4 สี ได้แก่ สีแดง สีชมพู สีน้ำเงินและสีฟ้า อย่างน้อยสีละ 40 เม็ด
3. ถุงพลาสติกใสแบบซิป

วิธีการทำกิจกรรม

กิจกรรมแบ่งเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 เป็นการจำลองการผสมลักษณะเดียว และตอนที่ 2 เป็นการจำลองการผสมสองลักษณะ เริ่มจากการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ จากนั้นศึกษาจีโนไทป์ของรุ่นลูกที่ได้จากการผสมระหว่างต้นพ่อและต้นแม่

กำหนดให้ พืชชนิดหนึ่งมียีนควบคุมลักษณะสีดอกและขอบใบดังนี้

แอลลีล A แทนด้วยลูกปัดสีแดง	ควบคุมลักษณะดอกสีแดง
แอลลีล a แทนด้วยลูกปัดสีชมพู	ควบคุมลักษณะดอกสีชมพู
แอลลีล B แทนด้วยลูกปัดสีน้ำเงิน	ควบคุมลักษณะขอบใบเรียบ
แอลลีล b แทนด้วยลูกปัดสีฟ้า	ควบคุมลักษณะขอบใบหยัก

ตอนที่ 1 การผสมลักษณะเดียว

1.1 นำลูกปัดสีแดงและสีชมพูอย่างละ 10 เม็ด ใส่ลงในถุงผ้าใบที่ 1 สุ่มหยิบลูกปัดครั้งละ 1 เม็ด ออกจากถุงจำนวน 30 ครั้ง และหลังการหยิบทุกครั้งใส่ลูกปัดคืนกลับลงในถุง บันทึกผล หาค่าเฉลี่ยและอัตราส่วนของการได้ลูกปัดสีแดงต่อลูกปัดสีชมพู

1.2 นำลูกปัดสีแดงและสีชมพูอย่างละ 10 เม็ด ใส่ลงในถุงผ้าใบที่ 2 สุ่มหยิบลูกปัดมาจากถุงผ้าใบที่ 1 (แทนต้นแม่) และใบที่ 2 (แทนต้นพ่อ) พร้อมกัน ครั้งละ 1 เม็ด จำนวน 50 ครั้ง โดยหลังการหยิบทุกครั้งให้ใส่ลูกปัดคืนกลับลงในถุง บันทึกผล หาอัตราส่วนของการได้สีลูกปัดทั้ง 3 กลุ่ม ดังนี้ ก) แดง-แดง ข) แดง-ชมพู หรือ ชมพู-แดง ค) ชมพู-ชมพู

คำถามท้ายกิจกรรม

? จากตอนที่ 1.1 ต้นแม่สร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ และมีโอกาสเกิดแต่ละแบบเท่าใด

? จากตอนที่ 1.2 ต้นพ่อและต้นแม่มีจีโนไทป์เป็นแบบใด

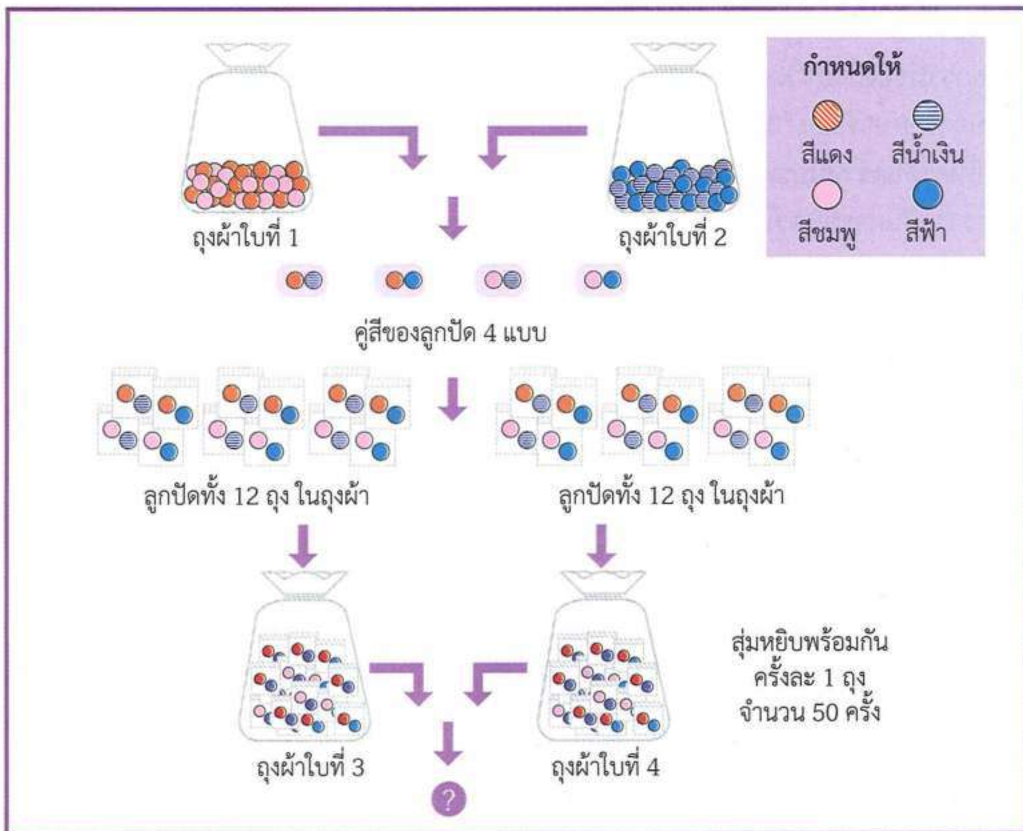
? จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของรุ่นลูกที่ได้ มีแบบใดบ้าง และมีโอกาสเกิดแต่ละแบบเท่าใด

? ถ้าการหยิบลูกปัดออกจากถุงเปรียบเทียบได้กับการแยกกันของแอลลีลในระหว่างการแบ่งเซลล์และการจับคู่กันของลูกปัดเปรียบเทียบได้กับการปฏิสนธิ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของเมนเดลที่ผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยพิจารณาลักษณะเดียวหรือไม่ อย่างไร

ตอนที่ 2 การผสมสองลักษณะ

2.1 นำลูกปัดสีแดงและสีชมพูอย่างละ 20 เม็ดใส่ลงในถุงใบที่ 1 นำลูกปัดสีน้ำเงินและสีฟ้าอย่างละ 20 เม็ด ใส่ลงในถุงผ้าใบที่ 2 จากนั้นสุ่มหยิบลูกปัดมาจากถุงผ้าใบที่ 1 และ 2 พร้อมกันครั้งละ 1 เม็ด จำนวน 50 ครั้ง และหลังการหยิบทุกครั้งใส่ลูกปัดคืนกลับลงในถุงผ้า บันทึกผล หาค่าเฉลี่ยและอัตราส่วนของการได้สีลูกปัดทั้ง 4 กลุ่ม ดังนี้ ก) แดง-น้ำเงิน ข) แดง-ฟ้า ค) ชมพู-น้ำเงิน ง) ชมพู-ฟ้า

2.2 จัดลูกปัดตามคู่สีที่ได้จากตอนที่ 2.1 ใส่ลงในถุงพลาสติกใสแบบซิป ถุงละ 1 คู่สี ปิดปากถุงให้สนิท จะได้ชุดละ 4 แบบ ทำถุงลูกปัดจำนวน 6 ชุด จากนั้นนำ 3 ชุด ใส่ลงในถุงผ้าใบที่ 3 และนำอีก 3 ชุด ใส่ในถุงผ้าใบที่ 4 ใช้มือสองข้างสุ่มหยิบถุงพลาสติกลูกปัดมาจากถุงผ้าใบที่ 3 (แทนต้นแม่) และ ใบที่ 4 (แทนต้นพ่อ) พร้อมกัน ครั้งละ 1 ถุง จำนวน 50 ครั้ง และหลังการหยิบทุกครั้งใส่ถุงลูกปัดคืนกลับลงในถุงผ้า บันทึกผล หาค่าเฉลี่ยและอัตราส่วนของการผสมที่ได้



คำถามท้ายกิจกรรม

- ? จากตอนที่ 2.1 ลูกปัดที่หยิบออกจากถุงผ้าใบที่ 1 และใบที่ 2 เป็นไปตามกฎของเมนเดลข้อใด
- ? จากตอนที่ 2.1 เมื่อลูกปัดสีแดงหรือชมพูจากถุงผ้าใบที่ 1 ไปรวมกับลูกปัดสีน้ำเงินหรือฟ้า จากถุงผ้าใบที่ 2 เป็นไปตามกฎของเมนเดลข้อใด
- ? จากตอนที่ 2.2 จีโนไทป์ของรุ่นลูกที่ได้จากการหยิบถุงพลาสติกลูกปัด มีกี่แบบ และมีโอกาสเกิดแต่ละแบบเท่าใด
- ? ถ้าการหยิบลูกปัดนี้เปรียบเทียบได้กับการแยกออกจากกันและการเข้าคู่ของแอลลีล เมื่อมีการแบ่งเซลล์และสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของเมนเดลที่ผสมพันธุ์ถั่วลันเตาโดยพิจารณาสองลักษณะหรือไม่ อย่างไร
- ? ถ้านำผลการทดลองของนักเรียนทุกคนในห้องมาวิเคราะห์ร่วมกัน ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลจะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร

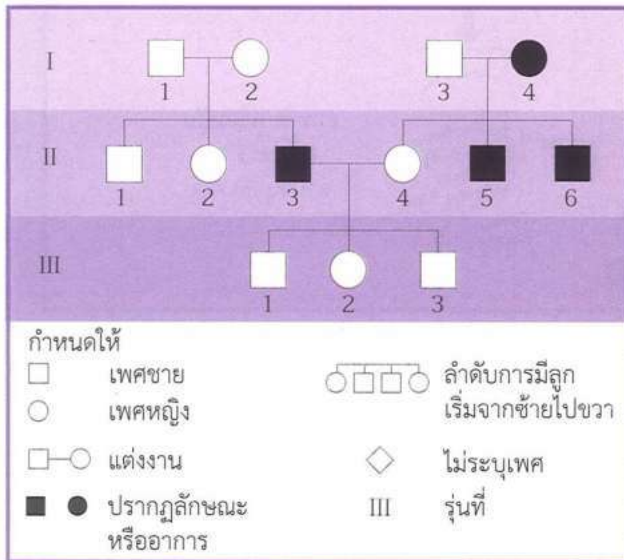
การประยุกต์ใช้กฎของเมนเดล

กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ และทำนายโอกาสการเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์ได้ ดังเช่นการนำมาประกอบการศึกษาพันธุประวัติ ซึ่งมีประโยชน์ในการระบุรูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม และช่วยให้ครอบครัวที่มีประวัติโรคทางพันธุกรรม เช่น โรคทาลัสซีเมีย และโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ สามารถวางแผนการมีบุตรในครอบครัว ดังตัวอย่างต่อไปนี้



ตัวอย่าง

จากพันธุประวัติของครอบครัวหนึ่งที่เป็นโรคทาลัสซีเมียซึ่งเป็นโรคทางพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยแอลลีลด้อยบนออโตโซม บุคคลที่ 3 ในรุ่น II ได้รับการถ่ายทอดลักษณะมาได้อย่างไร และหากบุคคลที่ 3 และ 4 ในรุ่น II วางแผนจะมีลูกเพิ่มอีกหนึ่งคน จะมีโอกาสที่ลูกจะเป็นโรคทาลัสซีเมียเป็นเท่าใด



รูป 5.9 พันธุประวัติโรคทาลัสซีเมียของครอบครัวหนึ่ง



ความรู้เพิ่มเติม

การศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของมนุษย์นั้นสามารถทำโดยใช้วิธีวิเคราะห์พันธุประวัติ ซึ่งเป็นการนำข้อมูลของลักษณะทางพันธุกรรมของบุคคลต่าง ๆ ในครอบครัวเดียวกันจากหลาย ๆ รุ่น มาเขียนเป็น**พันธุประวัติ** (pedigree) แผนผังพันธุประวัติประกอบด้วยสัญลักษณ์ต่าง ๆ แทนตัวบุคคล เพศ และลักษณะทางพันธุกรรม ดังตัวอย่าง

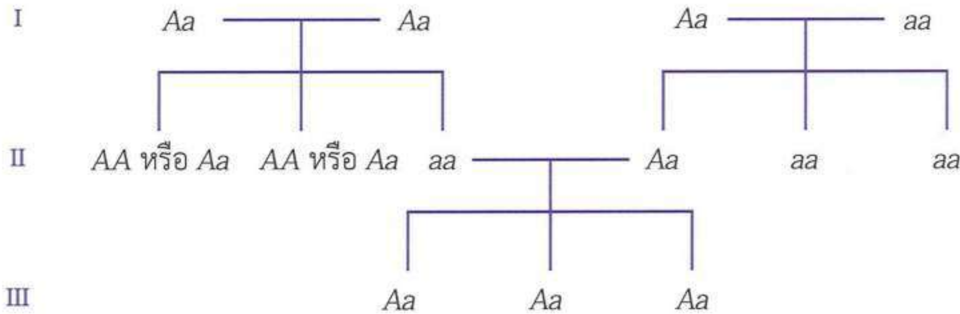


รู้หรือไม่

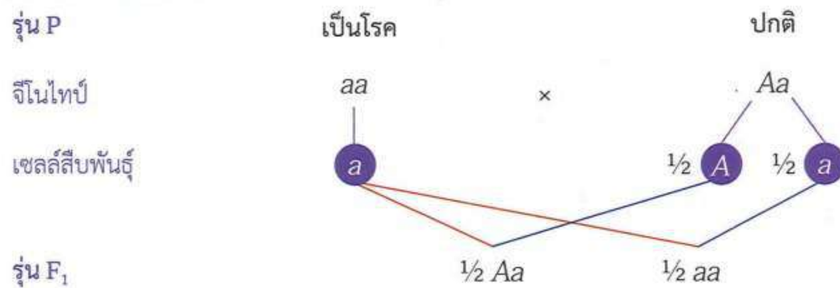
โรคทาลัสซีเมีย (thalassemia) เป็นโรคโลหิตจางเรื้อรัง เกิดจากมิวเทชันที่ส่งผลให้เซลล์เม็ดเลือดแดงมีลักษณะผิดปกติและมีจำนวนลดลง ในประเทศไทยมีผู้เป็นโรคทาลัสซีเมียประมาณ 600,000 คน และมีบุคคลที่ไม่เป็นโรคแต่เป็นพาหะของทาลัสซีเมียมากกว่า 20 ล้านคน

แนวการคิด

บุคคลที่ 3 ในรุ่น II ได้รับการถ่ายทอดแอลลีลควบคุมโรคทาลัสซีเมียมาจากพ่อและแม่ที่เป็นพาหะ (เป็นเฮเทอโรไซกัส) แสดงได้ดังนี้ โดยกำหนดให้ *A* แทนแอลลีลปกติ และ *a* แทนแอลลีลก่อโรค



ถ้าบุคคลที่ 3 และ 4 ในรุ่น II วางแผนจะมีบุตรเพิ่มอีกหนึ่งคน จะมีโอกาสเป็นโรคทาลัสซีเมียเท่ากับ ½ ดังภาพ



ประโยชน์อย่างหนึ่งของการใช้หลักการของเมนเดล คือใช้ในการคัดเลือกและผสมพันธุ์สัตว์ให้ได้ลักษณะตามต้องการ



ตัวอย่าง

เมื่อนำหนูขนสีดำพันธุ์แท้ผสมพันธุ์กับหนูขนสีน้ำตาลพันธุ์แท้ ปรากฏว่าลูกที่เกิดมีขนสีดำทั้งหมด (กำหนดให้ *B* และ *b* แทนแอลลีลคู่หนึ่งที่ควบคุมลักษณะสีขน)

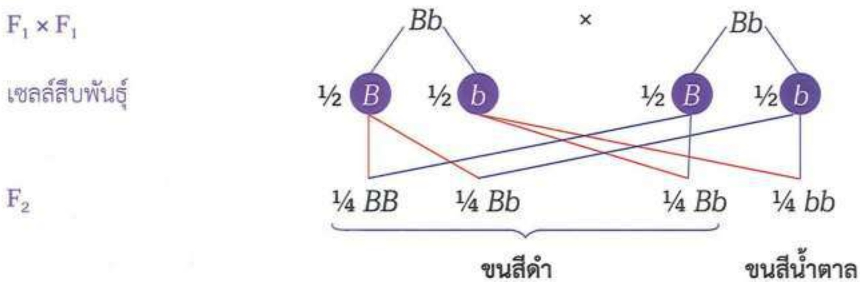
1. ขนสีใดเป็นลักษณะเด่น
2. จีโนไทป์ของรุ่น F_1 มีสภาพเป็นฮอมอไซกัสหรือเฮเทอโรไซกัส
3. ถ้านำรุ่น F_1 ผสมกันเอง โอกาสที่รุ่น F_2 จะมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง และมีอัตราส่วนเท่าใด
4. ถ้านำรุ่น F_1 ผสมกับหนูขนสีน้ำตาลพันธุ์แท้ จะได้รุ่นลูกที่มีจีโนไทป์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง และมีอัตราส่วนเท่าใด

แนวการคิด

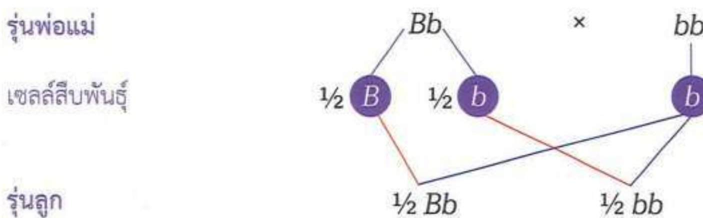
1. ข้อมูลนี้บอกให้ทราบว่าขนสีดำเป็นลักษณะเด่น ขนสีน้ำตาลเป็นลักษณะด้อย เพราะลูกที่เกิดมามีขนสีดำทั้งหมด
2. จีโนไทป์ของรุ่น F_1 มีสภาพเฮเทอโรไซกัส ดังแผนภาพ



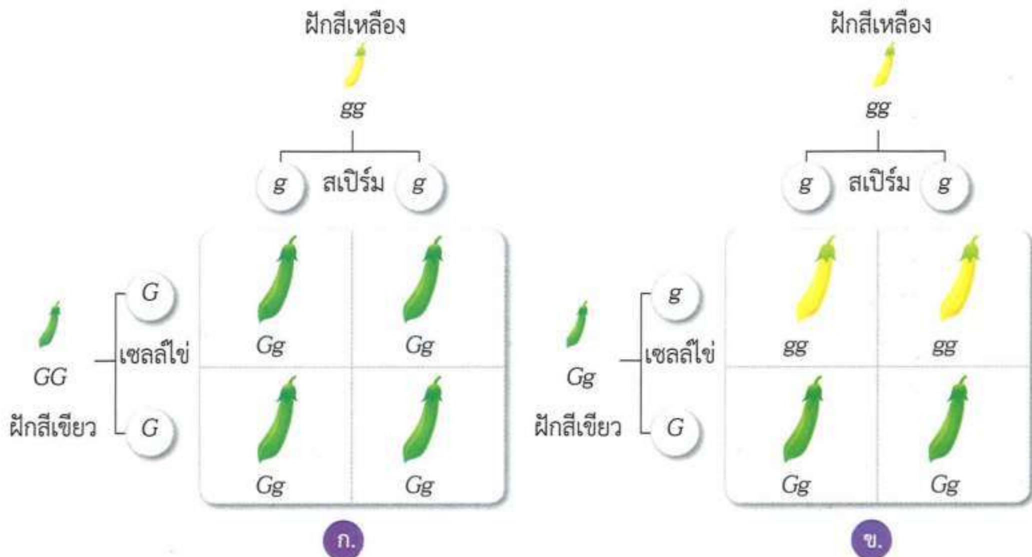
3. ถ้านำรุ่น F_1 ผสมกันเอง โอกาสที่รุ่น F_2 จะมีจีโนไทป์ 3 แบบ คือ *BB Bb* และ *bb* ในอัตราส่วน 1 : 2 :1 มีฟีโนไทป์ 2 แบบคือขนสีดำและขนสีน้ำตาล ในอัตราส่วน 3 : 1 ดังนี้



4. ถ้านำรุ่น F_1 ผสมกับหนูขนสีน้ำตาลพันธุ์แท้ (*bb*) จะได้รุ่นลูกที่มีจีโนไทป์ได้ 2 แบบ คือ *Bb* และ *bb* ในอันตราส่วน 1 : 1 ดังนี้



นอกจากนี้ มีการประยุกต์ใช้หลักการของเมนเดลในการเกษตร เช่น การคัดเลือกพันธุ์ การปรับปรุงพันธุ์ ในการคัดเลือกพันธุ์พืชอาจตรวจสอบว่า พืชที่แสดงลักษณะเด่นนั้นมีจีโนไทป์เป็นฮอมอไซกัสโดมิแนนท์ (*GG*) หรือเป็นเฮเทอโรไซกัส (*Gg*) สามารถทำได้โดย**การผสมทดสอบ** (testcross) โดยนำพืชที่สนใจมาผสมพันธุ์กับต้นที่มีลักษณะด้อย ถ้ารุ่นลูกที่ได้มีลักษณะเด่นทั้งหมด แสดงว่าพืชที่ต้องการทดสอบมีจีโนไทป์เป็น *GG* แต่ถ้ารุ่นลูกมีลักษณะด้อยปรากฏ แสดงว่าพืชที่ต้องการทดสอบนั้นมีจีโนไทป์เป็น *Gg* ดังรูป 5.10



รูป 5.10 การผสมทดสอบ
ก. กรณีที่ต้นที่ต้องการทดสอบมีจีโนไทป์เป็น *GG* ข. กรณีที่ต้นที่ต้องการทดสอบมีจีโนไทป์เป็น *Gg*

ในการปรับปรุงพันธุ์ อาจใช้**การผสมกลับ** (backcross) ซึ่งเป็นการผสมพันธุ์โดยนำลูกผสมไปผสมพันธุ์กับพ่อพันธุ์หรือแม่พันธุ์ การผสมกลับมีประโยชน์ในการปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสัตว์เพื่อให้ได้ลูกผสมที่มีลักษณะดีตามที่ต้องการเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ข้าวขาวดอกมะลิที่มีลักษณะความหอม ต้นเตี้ย ปริมาณผลผลิตสูง ปลูกได้ทุกฤดู แต่ไม่ทนเค็ม นำมาผสมพันธุ์กับข้าวพันธุ์ทนเค็ม จากนั้นนำรุ่น F_1 ไปผสมกลับกับข้าวขาวดอกมะลิหลาย ๆ รุ่น เพื่อให้ได้ข้าวที่มีลักษณะเหมือนข้าวขาวดอกมะลิและทนเค็ม

เมนเดลทดลองผสมพันธุ์ถั่วลันเตาด้วยความละเอียดรอบคอบ มีการเก็บข้อมูลจำนวนมาก วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติมาอธิบายและสรุปเป็นหลักการการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการเรียนรู้พันธุศาสตร์ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้มากมาย

ทั้งนี้การทดลองของเมนเดลศึกษาเฉพาะการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของยีนที่โลคัสเดียว และมีความเด่นสมบูรณ์ นั่นคือแอลลีลเด่นมีการข่มแอลลีลด้อย รุ่นลูกที่เกิดจากการผสมพันธุ์จากรุ่นพ่อแม่ที่เป็นเฮเทอโรไซกัสมีอัตราส่วนระหว่างลักษณะเด่นต่อลักษณะด้อยเป็น 3 : 1 อย่างไรก็ตามลักษณะทางพันธุกรรมส่วนใหญ่ในธรรมชาติไม่ได้เป็นไปตามการทดลองของเมนเดล ซึ่งนักเรียนจะได้ศึกษาต่อไป

5.2 ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล

เมื่อนักวิทยาศาสตร์ศึกษาลักษณะทางพันธุกรรมต่าง ๆ เช่น สีดอกลิ้นมังกร หมู่เลือด และความสูงของมนุษย์ พบว่ามีอัตราส่วนของฟีโนไทป์ในการถ่ายทอดลักษณะที่แตกต่างไปจากการทดลองของเมนเดล เรียกว่า ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็น**ส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล** (extensions of Mendelian genetics) ตัวอย่างเช่น ความเด่นไม่สมบูรณ์ ความเด่นร่วม มัลติเพิลแอลลีล ลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่ และการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเพศ ซึ่งในการอธิบายการสืบทอดลักษณะทางพันธุกรรมเหล่านี้ยังคงใช้กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดลได้

5.2.1 ความเด่นไม่สมบูรณ์

เมื่อนำต้นลิ้นมังกรที่มีดอกสีแดงผสมพันธุ์กับต้นที่มีดอกสีขาว พบว่ารุ่น F_1 ทุกต้นมีดอกสีชมพู ดังรูป 5.11 จะเห็นได้ว่ารุ่น F_1 มีลักษณะแตกต่างจากรุ่นพ่อแม่ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองของเมนเดล หากเป็นไปตามผลการทดลองของเมนเดล ถ้าแอลลีลควบคุมดอกสีแดงเป็นแอลลีลเด่น จะได้รุ่น F_1 ที่มีดอกสีแดงทั้งหมด หรือถ้าแอลลีลควบคุมดอกสีขาวเป็นแอลลีลเด่น จะได้รุ่น F_1 ที่มีดอกสีขาวทั้งหมด



ฮอมอไซกัส

×



ฮอมอไซกัส

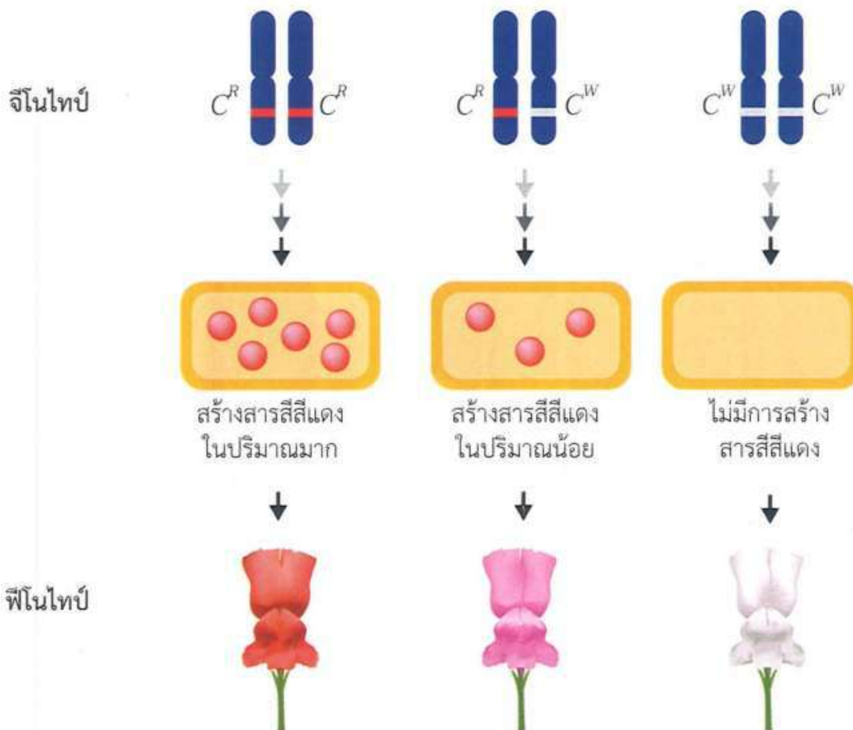
→



เฮเทอโรไซกัส

รูป 5.11 ต้นลิ้นมังกรที่มีดอกสีแดง สีขาว และสีชมพู

ความเด่นไม่สมบูรณ์ (incomplete dominance) เป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่แอลลีลหนึ่งไม่สามารถข่มอีกแอลลีลหนึ่งได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้สิ่งมีชีวิตที่เป็นเฮเทอโรไซกัสแสดงฟีโนไทป์ที่อยู่ระหว่างฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิตที่เป็นฮอมอไซกัสทั้งสองแบบ ดังในตัวอย่างข้างต้น ต้นลิ้นมังกรที่เป็นเฮเทอโรไซกัสจะออกดอกสีชมพู ซึ่งแสดงลักษณะสีที่อยู่ระหว่างแดงและขาว เนื่องจากต้นที่เป็นเฮเทอโรไซกัส (C^RC^W) มีแอลลีล C^R ที่ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารสีที่ทำให้ดอกลิ้นมังกรเป็นสีแดงเพียงแอลลีลเดียว ทำให้เกิดดอกลิ้นมังกรสีชมพูเพราะสร้างสารสีสีแดงได้ในปริมาณที่น้อยกว่าต้นที่เป็นฮอมอไซกัส C^RC^R ที่มีดอกสีแดง ดังรูป 5.12



รูป 5.12 จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของสีกลีบดอกลิ้นมังกร

กรณีลักษณะสีดอกของต้นลิ้นมังกรมีความแตกต่างจากกรณีสีดอกของต้นถั่วลันเตาในการศึกษาของเมนเดลโดยต้นเฮเทอโรไซกัสดอกสีม่วง (*Pp*) สามารถผลิตโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารสีที่ให้ดอกสีม่วงได้เพียงพอ ต้นเฮเทอโรไซกัสจึงมีดอกสีม่วงเหมือนฮอมอไซกัสโดมิแนนท์

อย่างไรก็ตาม การถ่ายทอดลักษณะสีดอกลิ้นมังกรจากรุ่นพ่อแม่สู่รุ่นลูกสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล เมื่อนำต้นลิ้นมังกรที่มีดอกสีแดง (C^RC^R) ผสมพันธุ์กับต้นที่มีดอกสีขาว (C^WC^W) จะให้ลูก F_1 ที่มีดอกสีชมพู (C^RC^W) เมื่อให้รุ่น F_1 ผสมกันแอลลีลจะแยกสู่เซลล์สืบพันธุ์และเมื่อเกิดการปฏิสนธิกันส่งผลให้ได้รุ่น F_2 ที่มี ดอกสีแดง : ดอกสีชมพู : ดอกสีขาว ในอัตราส่วน 1 : 2 : 1 และมีอัตราส่วนของจีโนไทป์ $C^RC^R : C^RC^W : C^WC^W$ เป็น 1 : 2 : 1 เช่นกัน ดังรูป 5.13

รุ่น P
ดอกสีแดง C^RC^R × ดอกสีขาว C^WC^W
เซลล์สืบพันธุ์ C^R C^W
รุ่น F_1
ดอกสีชมพู C^RC^W
เซลล์สืบพันธุ์ ½ C^R ½ C^W
รุ่น F_2
สเปิร์ม ½ C^R ½ C^W
เซลล์ไข่ ½ C^R ½ C^W
C^RC^R C^RC^W
C^RC^W C^WC^W

รูป 5.13 การถ่ายทอดลักษณะสีดอกของต้นลิ้นมังกรแบบความเด่นไม่สมบูรณ์

จีโนไทป์ในรุ่น F_2 : ¼ C^RC^R, ½ C^RC^W, ¼ C^WC^W
ฟีโนไทป์ในรุ่น F_2 : ¼ ดอกสีแดง, ½ ดอกสีชมพู, ¼ ดอกสีขาว



ความรู้เพิ่มเติม

ในกรณีการถ่ายทอดลักษณะแบบความเด่นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีแอลลีลใดเป็นแอลลีลเด่น จึงนิยมเขียนแอลลีลทั้งสองด้วยอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ เช่น แทนแอลลีลควบคุมสีดอกด้วย C (color) ให้ C^R แทนดอกสีแดง (red) และให้ C^W แทนดอกสีขาว (white)



ตัวอย่าง

ลักษณะที่มีการควบคุมแบบความเด่นไม่สมบูรณ์ในมนุษย์ เช่น การควบคุมระดับคอเลสเตอรอลในเลือด ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งทางด้านพันธุกรรมและการดำรงชีวิต โดยในผู้ป่วยที่มีระดับคอเลสเตอรอลสูงประเภทหนึ่งเกิดจากมิวเทชันของยีน *LDLR* (low-density lipoprotein receptor) ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างตัวรับ LDL ที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งส่งผลต่อระดับคอเลสเตอรอลในเลือด โดยบุคคลที่มีจีโนไทป์ L^HL^H สามารถสร้างตัวรับ LDL ได้ ส่วนบุคคลที่มีจีโนไทป์ L^HL^h สร้างตัวรับ LDL ได้ในปริมาณน้อย ส่งผลให้มีโอกาสมีคอเลสเตอรอลค่อนข้างสูง ส่วนบุคคลที่มีจีโนไทป์ L^hL^h ไม่สามารถสร้างตัวรับ LDL ได้ ส่งผลให้มีคอเลสเตอรอลในเลือดสูงมากและมีโอกาสเป็นโรคหัวใจตั้งแต่อายุน้อยได้ ดังรูป 5.14

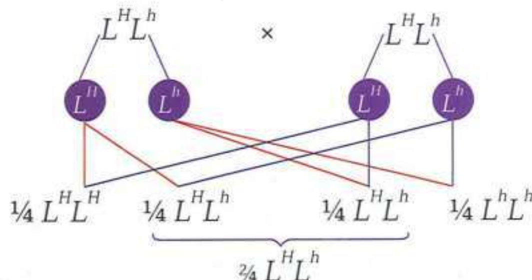


รูป 5.14 จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของลักษณะการควบคุมระดับคอเลสเตอรอลในเลือด

ถ้าชายที่มีจีโนไทป์ L^HL^h แต่งงานกับหญิงที่มีจีโนไทป์ L^HL^h โอกาสที่จะมีลูกที่มีคอเลสเตอรอลในเลือดค่อนข้างสูงเป็นเท่าใด

แนวการคิด

มีโอกาสมีลูกที่มีคอเลสเตอรอลในเลือดค่อนข้างสูง (L^HL^h) เป็น ½ หรือร้อยละ 50

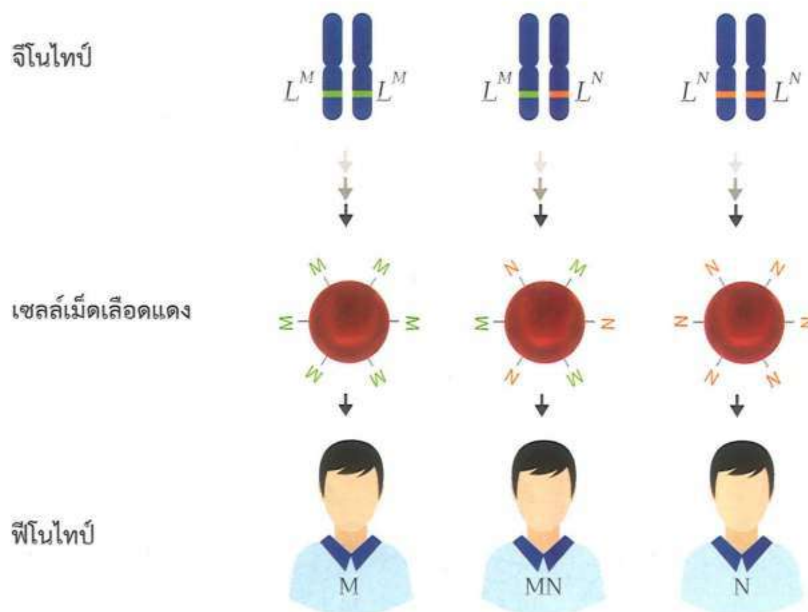


5.2.2 ความเด่นร่วม

ความเด่นร่วม (codominance) เป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่แอลลีลทั้งสองแอลลีลบนคู่ฮอมอโลกัสโครโมโซมสามารถแสดงออกได้เท่า ๆ กัน ทำให้สิ่งมีชีวิตที่เป็นเฮเทอโรไซกัสแสดงฟีโนไทป์ของทั้งสองแอลลีลร่วมกัน

ระบบหมู่เลือดของมนุษย์นั้นมีหลายระบบ เช่น ระบบ ABO ระบบ MN และระบบ Rh เป็นต้น หมู่เลือดระบบ MN ของมนุษย์ จำแนกตามชนิดของไกลโคโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดง โดยยีนควบคุมหมู่เลือดระบบ MN ของมนุษย์ มีแอลลีล 2 รูปแบบ คือ แอลลีล L^M ควบคุมการสร้างไกลโคโปรตีน M และ L^N ควบคุมการสร้างไกลโคโปรตีน N ดังนั้นบนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดงของบุคคลที่มีจีโนไทป์ L^ML^M จะมีไกลโคโปรตีน M และบุคคลที่มีจีโนไทป์ L^NL^N จะมีไกลโคโปรตีน N ส่วนบุคคลที่มีจีโนไทป์เป็น L^ML^N นั้นจะมีทั้งไกลโคโปรตีน M และ N

ในกรณีที่ทั้งพ่อและแม่เป็นเฮเทอโรไซกัส ลูกจะมีโอกาสมีฟีโนไทป์เป็นเลือดหมู่ M เลือดหมู่ MN หรือ เลือดหมู่ N ในอัตราส่วน 1 : 2 : 1 ส่งผลให้อัตราส่วนของลักษณะดังกล่าวนี้แตกต่างไปจากลักษณะที่เมนเดลศึกษา ดังรูป 5.15



รูป 5.15 จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของหมู่เลือดระบบ MN ในมนุษย์



ความรู้เพิ่มเติม



จากที่นักเรียนได้ศึกษารูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบต่าง ๆ ทั้ง ความเด่นสมบูรณ์ ความเด่นไม่สมบูรณ์ และความเด่นร่วม จะเห็นได้ว่าการระบุว่าลักษณะใดเป็นลักษณะเด่นนั้นพิจารณาจากฟีโนไทป์ แต่เมื่อพิจารณาในระดับโมเลกุลจะเห็นว่าแอลลีลหนึ่งไม่ได้มีการยับยั้งการแสดงออกของอีกแอลลีล แต่มีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกันและมีโปรตีนที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น โรคโลหิตจางแบบซิกเกิลเซลล์ บุคคลที่มีจีโนไทป์เป็นฮอมอไซกัสรีเซสสีฟจะมีอาการโลหิตจาง ส่วนบุคคลที่มีจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซกัสโดยทั่วไปจะไม่แสดงอาการ แต่เมื่อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอเป็นเวลานานจะแสดงอาการ เมื่อพิจารณาลักษณะของเซลล์เม็ดเลือดแดงจะพบว่าบุคคลที่มีจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซกัส มีการแสดงออกของทั้งสองแอลลีล โดยพบทั้งเซลล์เม็ดเลือดแดงรูปเคียวและรูปร่างปกติ

5.2.3 มัลติเพิลแอลลีล

การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่นักเรียนศึกษาก่อนหน้านี้ แต่ละลักษณะถูกควบคุมด้วยยีนโลคัสเดียวและมีแอลลีลเพียง 2 รูปแบบ เช่น ยีนควบคุมรูปร่างของเมล็ดถั่วลันเตามีแอลลีลที่ควบคุมเมล็ดกลมและแอลลีลที่ควบคุมเมล็ดขรุขระ แต่การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะแตกต่างออกไป ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีการควบคุมด้วยยีนที่โลคัสเดียวบนฮอมอโลกัสโครโมโซม แต่มีแอลลีลมากกว่า 2 รูปแบบ เรียกว่า **มัลติเพิลแอลลีล** (multiple alleles) เช่น หมู่เลือดระบบ ABO ของมนุษย์ โดยยีนที่ควบคุมหมู่เลือดระบบ ABO มี 3 แอลลีล ซึ่งมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกัน ดังรูป 5.16



รูป 5.16 มัลติเพิลแอลลีลของยีนบนโลคัสเดียวกันของหมู่เลือดระบบ ABO

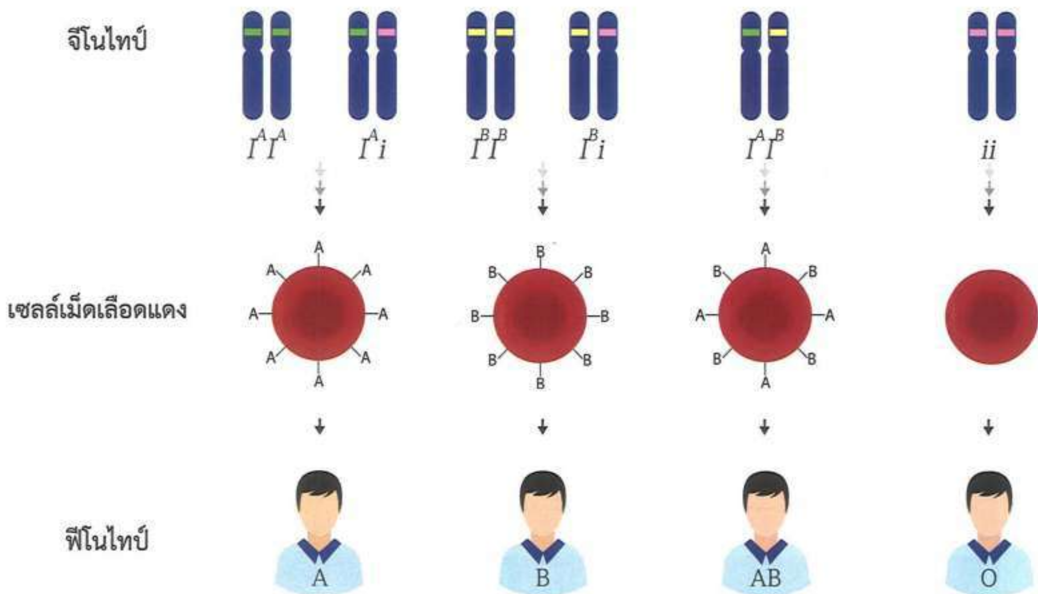
มนุษย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์ (diploid) ดังนั้นแต่ละบุคคลจึงมีได้เพียง 2 แอลลีลเท่านั้น โดยแอลลีลหนึ่งได้รับการถ่ายทอดมาจากพ่อ และอีกแอลลีลหนึ่งได้รับมาจากแม่ โดยทั้งแอลลีล I^A และแอลลีล I^B เป็นแอลลีลเด่นทั้งคู่ และสามารถข่มแอลลีล i ที่เป็นแอลลีลด้อยได้อย่างสมบูรณ์

ในกรณีของบุคคลที่มีจีโนไทป์เป็น I^Ai นั้น มีแอลลีล I^A ที่ควบคุมการสร้างแอนติเจน A บนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดง ทำให้บุคคลนั้นมีเลือดหมู่ A

ในบุคคลที่มีเลือดหมู่ AB มีจีโนไทป์เป็น I^AI^B โดยแอลลีล I^A และแอลลีล I^B มีการถ่ายทอดแบบเด่นร่วมจึงแสดงออกทั้งสองลักษณะได้เท่า ๆ กัน ทำให้มีทั้งแอนติเจน A และแอนติเจน B บนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดง

ส่วนบุคคลที่มีเลือดหมู่ O มีจีโนไทป์เป็น ii ซึ่งไม่มีทั้งแอลลีล I^A และแอลลีล I^B จึงทำให้ไม่มีการสร้างทั้งแอนติเจน A และแอนติเจน B

ดังนั้น ลักษณะหมู่เลือดมีฟีโนไทป์ได้ถึง 4 รูปแบบ คือ เลือดหมู่ A เลือดหมู่ B เลือดหมู่ AB และเลือดหมู่ O ซึ่งแต่ละหมู่มีชนิดของคาร์โบไฮเดรตหรือแอนติเจนที่อยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดงแตกต่างกันดังรูป 5.17



รูป 5.17 จีโนไทป์และฟีโนไทป์ของหมู่เลือดระบบ ABO

เมื่อพิจารณาการถ่ายทอดลักษณะหมู่เลือดระบบ ABO จากรุ่นพ่อแม่สู่รุ่นลูกสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการแยกของเมนเดลได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

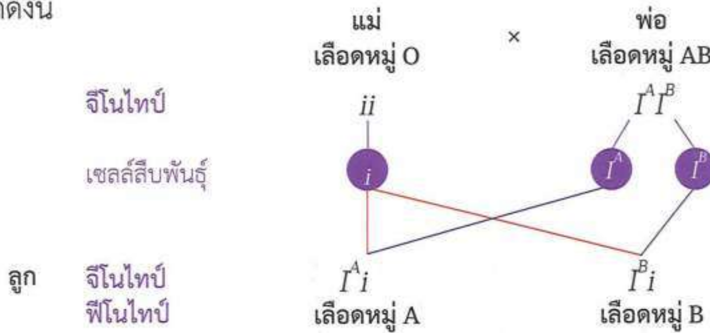


ตัวอย่าง

เมื่อแม่มีเลือดหมู่ O และพ่อมีเลือดหมู่ AB ลูกจะมีโอกาสมีเลือดหมู่ A หรือ B เป็นอัตราส่วนเท่าใด

แนวการคิด

ในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของพ่อแอลลีล I^A และแอลลีล I^B แยกออกจากกันสู่เซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์ เช่นเดียวกับการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ของแม่ที่แอลลีล i แยกจากกันสู่เซลล์สืบพันธุ์ ดังนั้นลูกจะมีโอกาสมีเลือดหมู่ A หรือ B ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยมีการถ่ายทอดลักษณะหมู่เลือดดังนี้





กิจกรรม 5.3 การแก้โจทย์ปัญหา เรื่องความเด่นไม่สมบูรณ์ ความเด่นร่วม และมัลติเพิลแอลลีล

จุดประสงค์

อธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบความเด่นไม่สมบูรณ์ ความเด่นร่วม และมัลติเพิลแอลลีล และนำหลักการไปใช้ในการวิเคราะห์โจทย์ปัญหา

วิธีการทำกิจกรรม

ตอบคำถามจากโจทย์ปัญหาต่อไปนี้

1. ลักษณะเส้นผมในมนุษย์มีจีโนไทป์ 3 รูปแบบ ดังนี้ จีโนไทป์ H^CH^C แสดงลักษณะผมหยิก H^SH^S แสดงลักษณะผมเหยียดตรง และ H^CH^S แสดงลักษณะผมเป็นลอนหรือหยักศก
   1.1 ถ้าพ่อมีผมเหยียดตรงและแม่มีผมหยิก ลูกที่เกิดมาจะมีจีโนไทป์และฟีโนไทป์เป็นอย่างไร จงเขียนแผนภาพแสดงการถ่ายทอดลักษณะดังกล่าว
   1.2 นักเรียนคิดว่าเส้นผมในมนุษย์มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบใด จงอธิบาย

2. เมื่อผสมพันธุ์ระหว่างงูเหลือมพันธุ์แท้มีลายทางกับงูเหลือมพันธุ์แท้มีลายจุด จะได้รุ่น F_1 เป็นงูเหลือมที่มีลายทางผสมกับลายจุด เมื่อให้รุ่น F_1 ผสมกันเอง จงหาโอกาสของรุ่น F_2 ที่มีลักษณะเหมือนรุ่น F_1

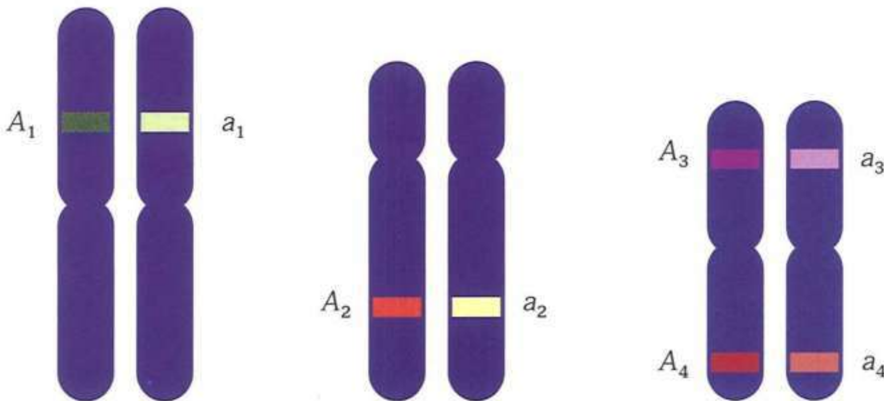
3. จงใช้เหตุผลทางพันธุศาสตร์มาอธิบายความเป็นไปได้ของข้อความต่อไปนี้
   3.1 แม่และลูกมีเลือดหมู่ O แต่ชายที่อ้างว่าเป็นพ่อมีเลือดหมู่ AB
   3.2 หญิงคนหนึ่งมีเลือดหมู่ AB ยืนยันว่าลูกที่มีเลือดหมู่ A เป็นลูกของชายที่มีเลือดหมู่ O

4. ถ้าพ่อมีเลือดหมู่ในระบบ ABO และระบบ MN เป็น A และ M ส่วนแม่มีเลือดหมู่เป็น B และ N ตามลำดับ ลูกจะมีโอกาสมีฟีโนไทป์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง

5.2.4 ลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่

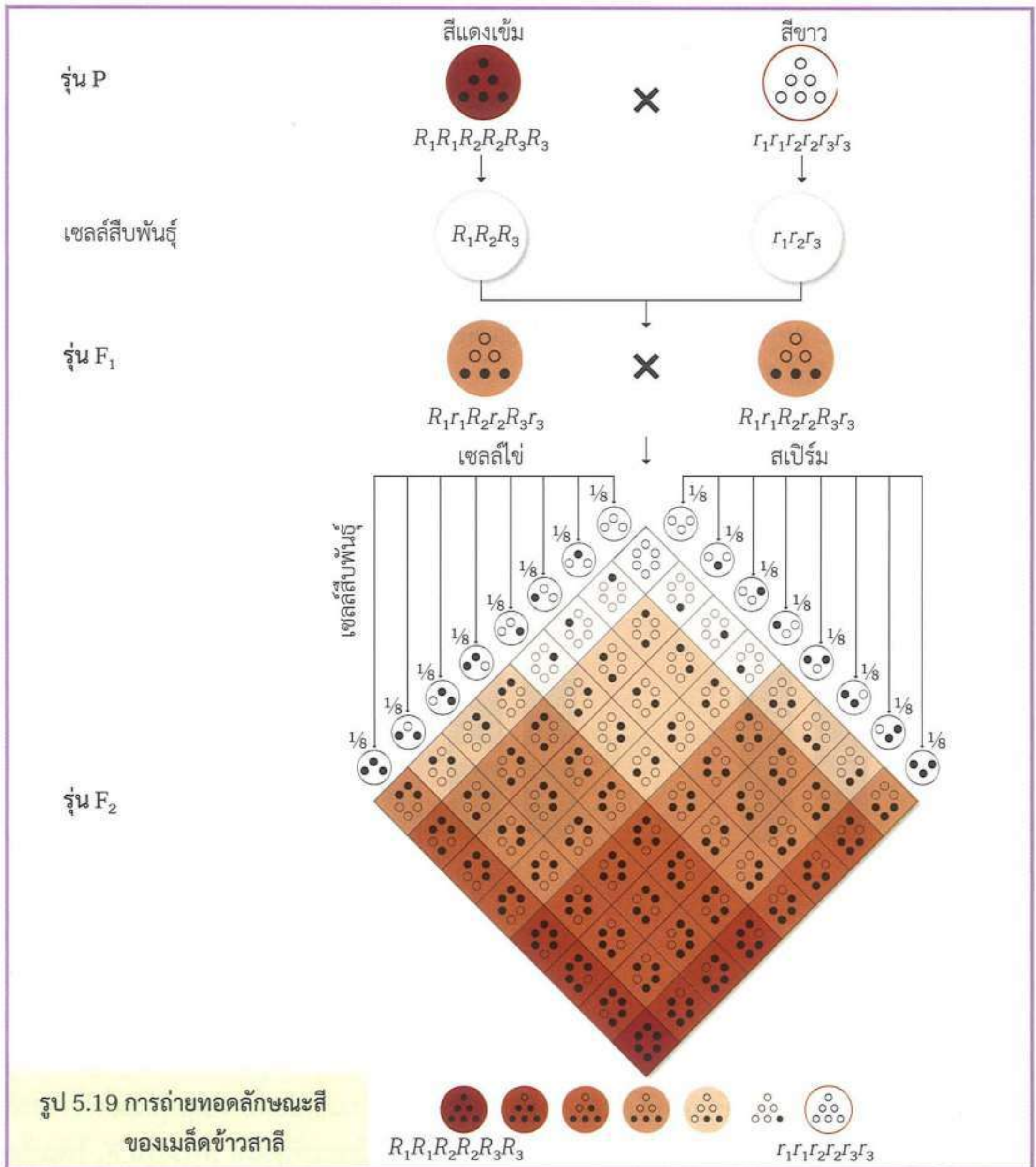
ลักษณะทางพันธุกรรมที่เมนเดลศึกษาแต่ละลักษณะควบคุมด้วยยีน 1 คู่ ซึ่งแต่ละฟีโนไทป์มีความแตกต่างกันชัดเจน แต่บางลักษณะในธรรมชาติมีความแตกต่างกันเล็กน้อยและลดหลั่นกันไป เช่น ขนาดของเมล็ดถั่วลันเตา สีตา และความสูงของมนุษย์ **ลักษณะที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยและลดหลั่นกันไปนี้มีการควบคุมลักษณะแตกต่างจากการทดลองของเมนเดลอย่างไร**

ลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่ (polygenic trait) เป็นลักษณะทางพันธุกรรมหนึ่งลักษณะที่ถูกควบคุมด้วยยีนหลายคู่ที่มีตำแหน่งบนโครโมโซมแตกต่างกัน ซึ่งอาจอยู่บนคู่ฮอมอโลกัสโครโมโซมเดียวกันหรือต่างกันก็ได้ ดังรูป 5.18



รูป 5.18 ยีนหลายคู่ที่ควบคุมลักษณะเดียวกัน

ตัวอย่างเช่น การถ่ายทอดลักษณะสีของเมล็ดข้าวสาลีมียีนควบคุม 3 คู่ กำหนดให้ R_1 R_2 และ R_3 เป็นแอลลีลที่ควบคุมให้เมล็ดข้าวสาลีมีสีแดง ส่วน r_1 r_2 และ r_3 เป็นแอลลีลที่ควบคุมให้เมล็ดข้าวสาลีมีสีขาว เมื่อผสมพันธุ์ข้าวสาลีที่มีเมล็ดสีแดงเข้มพันธุ์แท้กับเมล็ดสีขาวพันธุ์แท้ พบว่ารุ่น F_1 ให้เมล็ดสีแดงปานกลาง ($R_1r_1R_2r_2R_3r_3$) เมื่อนำรุ่น F_1 มาผสมพันธุ์กัน จะได้รุ่น F_2 ที่มีสีของเมล็ดข้าวสาลีแตกต่างกัน ดังรูป 5.19



รูป 5.19 การถ่ายทอดลักษณะสีของเมล็ดข้าวสาลี

? เมล็ดข้าวสาลีในรุ่น F_2 มีฟีโนไทป์กี่แบบ คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด

? เมล็ดข้าวสาลีในรุ่น F_2 จะมีโอกาสมีฟีโนไทป์เหมือนรุ่น F_1 เป็นเท่าใด

? ระดับความเข้มของสีเมล็ดข้าวสาลีขึ้นอยู่กับสิ่งใด

? เมื่อนำต้นข้าวสาลีที่มีจีโนไทป์ $R_1r_1R_2r_2R_3R_3$ ผสมพันธุ์กับ $R_1r_1R_2R_2r_3r_3$ ต้นพ่อและต้นแม่จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ และรุ่นลูกมีโอกาสมีฟีโนไทป์ได้กี่แบบ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ารุ่น F_2 มีฟีโนไทป์แตกต่างกัน 7 แบบ ตั้งแต่เมล็ดที่มีสีแดงเข้มและเมล็ดที่มีความเข้มของสีแดงลดน้อยลงเป็นลำดับ จนถึงเมล็ดที่มีสีขาว เมล็ดข้าวสาลีที่มีจีโนไทป์ $R_1R_1R_2R_2R_3R_3$ จะแสดงลักษณะเมล็ดสีแดงเข้ม โดยจีโนไทป์ที่มีแอลลีล R ลดลงจะทำให้ระดับความเข้มของสีเมล็ดลดลงเป็นลำดับ ส่วนเมล็ดข้าวสาลีที่มีจีโนไทป์ $r_1r_1r_2r_2r_3r_3$ จะแสดงลักษณะเมล็ดสีขาว

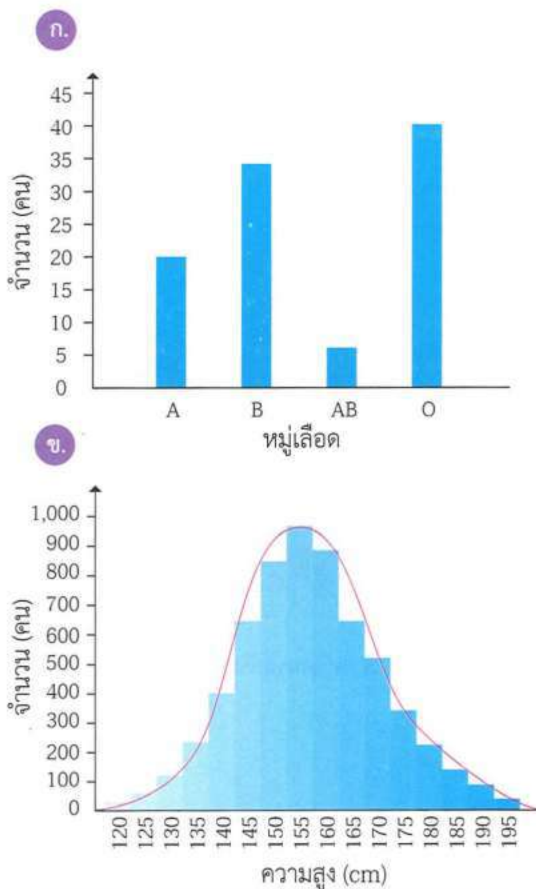
การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยยีนหลายคู่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล ซึ่งสอดคล้องกับกฎการแยก โดยในรุ่น F_1 แอลลีล R_1 จะแยกออกจาก r_1 ในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะมีเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่ง ซึ่งการแยกของแอลลีลนี้เกิดใน R_2r_2 และ R_3r_3 เช่นเดียวกัน และแอลลีลของยีนที่แยกออกจากกันแล้วนี้ จะมีการจัดกลุ่มอย่างอิสระกับแอลลีลที่แยกจากกันของคู่อื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ

การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมแบบมัลติเพิลแอลลีลแตกต่างจากลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่อย่างไร

การแปรผันต่อเนื่องและการแปรผันไม่ต่อเนื่อง

สำหรับลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยยีนตำแหน่งเดียว แต่ละฟีโนไทป์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น สีของเมล็ดถั่วลันเตาจะมีเมล็ดสีเหลืองหรือเมล็ดสีเขียว ลักษณะหมู่เลือด ABO มีฟีโนไทป์ 4 แบบ คือ เลือดหมู่ A เลือดหมู่ B เลือดหมู่ AB และเลือดหมู่ O ซึ่งลักษณะที่มีความแตกต่างกันชัดเจนเหล่านี้มี**การแปรผันไม่ต่อเนื่อง** (discontinuous variation) ดังรูป 5.20 ก.

ส่วนลักษณะทางพันธุกรรมควบคุมด้วยยีนหลายคู่นั้น ฟีโนไทป์มีหลากหลายและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ลักษณะเหล่านี้สามารถตรวจวัดในเชิงปริมาณได้ เช่น ส่วนสูงของมนุษย์ สีผิว ขนาดของเมล็ดถั่ว ปริมาณน้ำนมของวัว ซึ่งลักษณะทางพันธุกรรมเหล่านี้มี**การแปรผันต่อเนื่อง** (continuous variation) ดังรูป 5.20 ข. และบางลักษณะพบว่าสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลสูงต่อการแสดงออกของยีน เช่น เมื่อมีการออกกำลัง

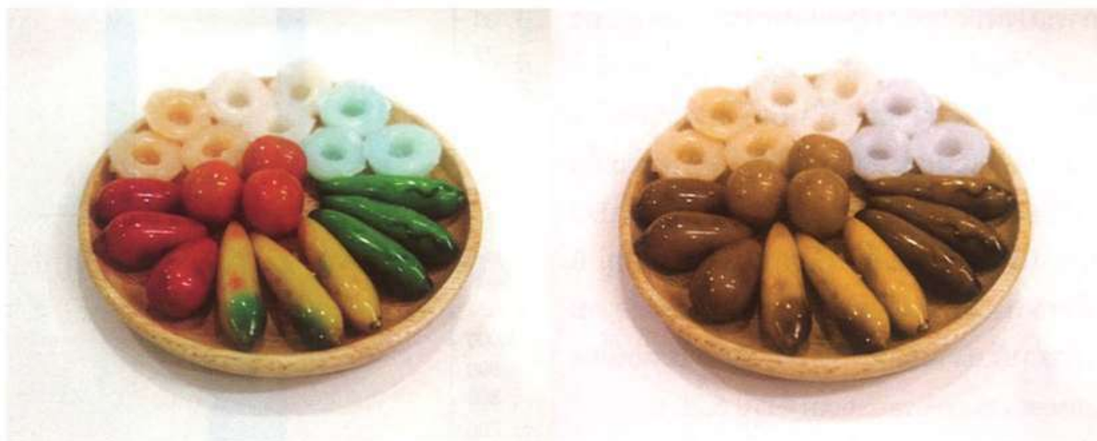


รูป 5.20 กราฟแสดงการแปรผันของลักษณะ
ก. เลือดหมู่ในหมู่เลือดระบบ ABO
ข. ความสูง

และรับประทานอาหารที่เหมาะสมจะมีความสูงเพิ่มขึ้น เมื่อเขียนกราฟแสดงขนาดของประชากรในแต่ละฟีโนไทป์จะเห็นได้ว่าฟีโนไทป์มีการกระจายอย่างต่อเนื่องหรือกระจายแบบโค้งปกติ (normal distribution)

5.2.5 การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเพศ

โครโมโซมของมนุษย์มีจำนวน 23 คู่ โดยเป็นออโตโซม 22 คู่ และโครโมโซมเพศ 1 คู่ ในเพศหญิงมีโครโมโซมเพศเป็น XX ส่วนในเพศชายมีโครโมโซมเพศเป็น XY ลักษณะทางพันธุกรรมของมนุษย์มีทั้งที่ควบคุมด้วยยีนที่อยู่บนออโตโซมและโครโมโซมเพศ โดยยีนจำนวนมากอยู่บนออโตโซม เช่น สีตา ผิวเผือก โรคทาลัสซีเมีย และ หมู่เลือด ABO แต่ลักษณะพันธุกรรมบางลักษณะควบคุมด้วยยีนที่อยู่บนโครโมโซมเพศ เรียกว่า **ยีนที่เกี่ยวเนื่องกับเพศ** (sex-linked gene) เช่น ลักษณะตาบอดสีเขียว-แดงในมนุษย์ ทำให้มองเห็นสีแตกต่างไปจากผู้ที่มีตาปกติ ดังรูป 5.21 **การถ่ายทอดยีนที่อยู่บนโครโมโซมเพศแตกต่างจากการถ่ายทอดยีนที่อยู่บนออโตโซมหรือไม่ อย่างไร**



ภาพที่คนปกติมองเห็น ภาพที่คนตาบอดสีเขียว-แดงมองเห็น

รูป 5.21 สีภาพที่คนปกติและคนตาบอดสีเขียว-แดงมองเห็น

ในปี พ.ศ. 2453 ทอมัส มอร์แกน (Thomas Morgan) และคณะ ได้ทดลองผสมพันธุ์แมลงหวี่ (*Drosophila melanogaster*) และพบลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมเพศ โดยแมลงหวี่มีโครโมโซม 4 คู่ แมลงหวี่เพศเมียมีโครโมโซมเพศเป็น XX ส่วนเพศผู้มีโครโมโซมเพศเป็น XY



ตาสีแดง ตาสีขาว

รูป 5.22 ลักษณะสีตาของแมลงหวี่

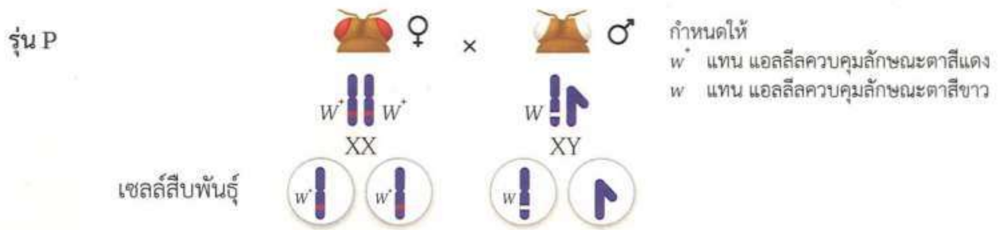
แมลงหวี่มีลักษณะที่แตกต่างกันหลายลักษณะ ลักษณะที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ตาสีแดงเรียกว่าลักษณะปกติ (wild type) ส่วนลักษณะอื่น เช่น ตาสีขาว เรียกว่าพันธุ์กลาย (mutant) ดังรูป 5.22 ซึ่งอาจเกิดมิวเทชันจากลักษณะปกติโดยพันธุ์กลายอาจจะเป็นลักษณะเด่นหรือด้อยก็ได้ มอร์แกนพบแมลงหวี่เพศผู้ที่มีตาสีขาว และนำแมลงหวี่เพศผู้ตาสีขาวมาผสมกับแมลงหวี่เพศเมียตาสีแดง ได้รุ่น F_1 ตาสีแดงทุกตัว

เมื่อผสมพันธุ์ภายในรุ่น F_1 พบว่าในรุ่น F_2 แมลงหวี่เพศเมียทั้งหมดตาสีแดง โดยพบแมลงหวี่ตาสีขาวเฉพาะในเพศผู้เท่านั้น ซึ่งในเพศผู้นี้พบอัตราส่วนตาสีแดงต่อตาสีขาวเป็น 1 : 1 ดังรูป 5.23 **การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมนี้แตกต่างจากการทดลองของเมนเดลอย่างไร**

? จากผลการทดลองการถ่ายทอดลักษณะสีตาของแมลงหวี่ ในรูป 5.23 ทราบหรือไม่ว่าลักษณะใดเป็นลักษณะเด่นและลักษณะใดเป็นลักษณะด้อย

? แมลงหวี่เพศเมียจะมีโอกาสมีตาสีขาวได้หรือไม่ อย่างไร

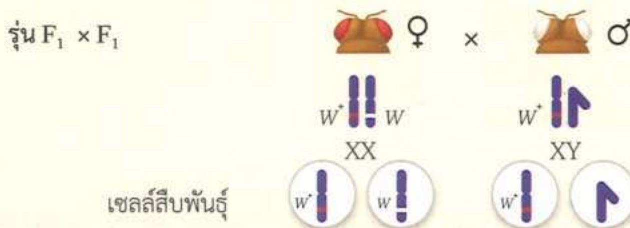
? เมื่อผสมสลับลักษณะระหว่างเพศเมียและเพศผู้ โดยผสมแมลงหวี่เพศเมียตาสีขาวกับเพศผู้ตาสีแดง ผลที่ได้จะแตกต่างจากแมลงหวี่เพศเมียตาสีแดงพันธุ์แท้ผสมกับเพศผู้ตาสีขาวหรือไม่ อย่างไร

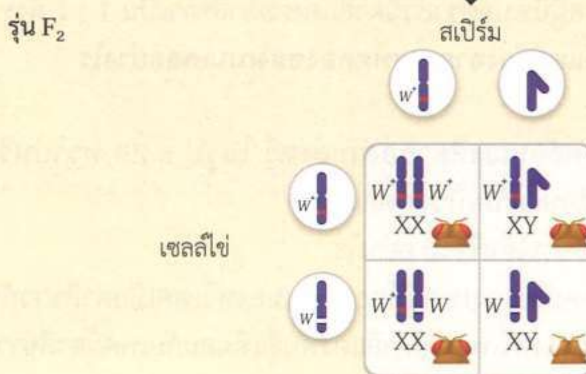




จีโนไทป์ในรุ่น F_1 : ½ w^+w, ½ w^+Y

ฟีโนไทป์ในรุ่น F_1 : ½ เพศเมียตาสีแดง, ½ เพศผู้ตาสีแดง





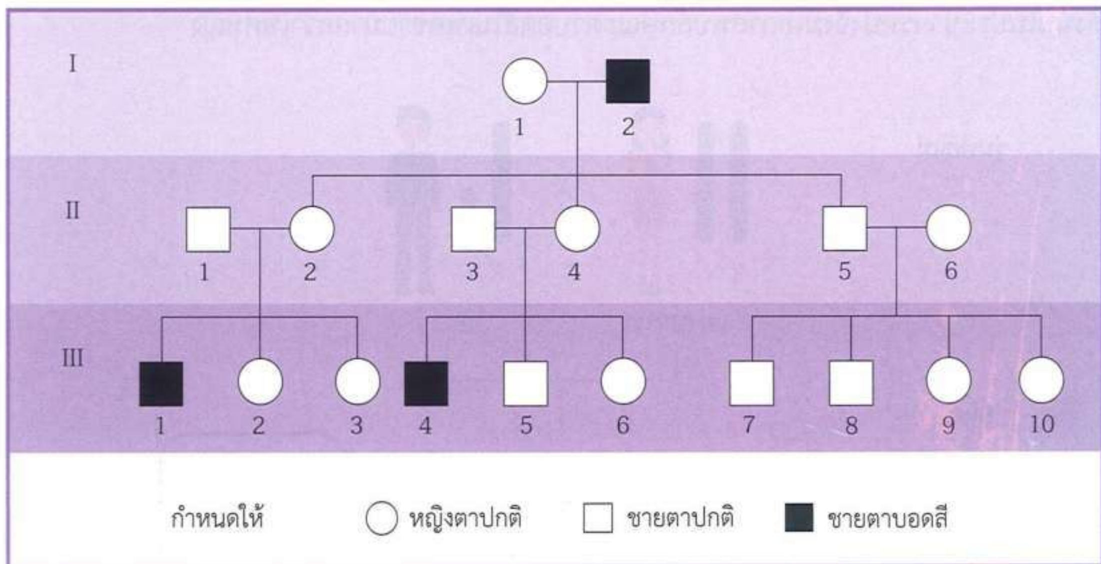
จีโนไทป์ในรุ่น F_2 : ¼ w^+w^+, ¼ w^+w, ¼w^+Y, ¼ wY

ฟีโนไทป์ในรุ่น F_2 : ½ เพศเมียตาสีแดง, ¼ เพศผู้ตาสีแดง, ¼ เพศผู้ตาสีขาว

รูป 5.23 การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม X ของแมลงหวี่เพศเมียตาสีแดงพันธุ์แท้ผสมกับเพศผู้ตาสีขาว

จากผลการทดลองดังกล่าว สรุปได้ว่าลักษณะสีตาของแมลงหวี่เกิดจากการถ่ายทอดลักษณะของ**ยีนบนโครโมโซม X** (X-linked gene) โดยตาสีแดงเป็นลักษณะเด่น และตาสีขาวเป็นลักษณะด้อย ส่วนบนโครโมโซม Y ไม่มียีนที่ควบคุมลักษณะสีตา แมลงหวี่รุ่นลูกเพศเมียจะได้รับโครโมโซม X มาจากพ่อและแม่ ส่วนแมลงหวี่รุ่นลูกเพศผู้จะได้รับโครโมโซม X มาจากแม่และโครโมโซม Y มาจากพ่อ จึงแสดงลักษณะตามยีนบนโครโมโซม X ที่ได้รับจากแม่ ดังนั้นแมลงหวี่รุ่นลูกเพศผู้ที่มีแอลลีลควบคุมตาสีขาวเพียงแอลลีลเดียวจะแสดงลักษณะตาสีขาว ส่วนแมลงหวี่รุ่นลูกเพศเมียจะแสดงลักษณะตาสีขาวเมื่อมีแอลลีลควบคุมตาสีขาว 2 แอลลีล

ลักษณะทางพันธุกรรมในมนุษย์บางลักษณะมีการควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซม X เช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ลักษณะตาบอดสีเขียว-แดง โรคฮีโมฟิเลีย และโรคภาวะพร่องเอนไซม์ G-6-PD (glucose-6-phosphate dehydrogenase deficiency) ซึ่งลักษณะเหล่านี้เป็นลักษณะด้อย ส่วนโรคทางพันธุกรรมที่เป็นลักษณะเด่นควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซม X นั้นพบได้น้อย สามารถศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซม X จากพันธุประวัติได้ ดังตัวอย่างในรูป 5.24



รูป 5.24 พันธุประวัติลักษณะตาบอดสีเขียว-แดงของครอบครัวหนึ่ง

? ผู้ชายคนที่ 1 และคนที่ 4 ในรุ่นที่ III ได้รับการถ่ายทอดแอลลีลตาบอดสีเขียว-แดงมาได้อย่างไร

? ลักษณะตาบอดสีเขียว-แดงส่วนใหญ่ปรากฏในเพศใด

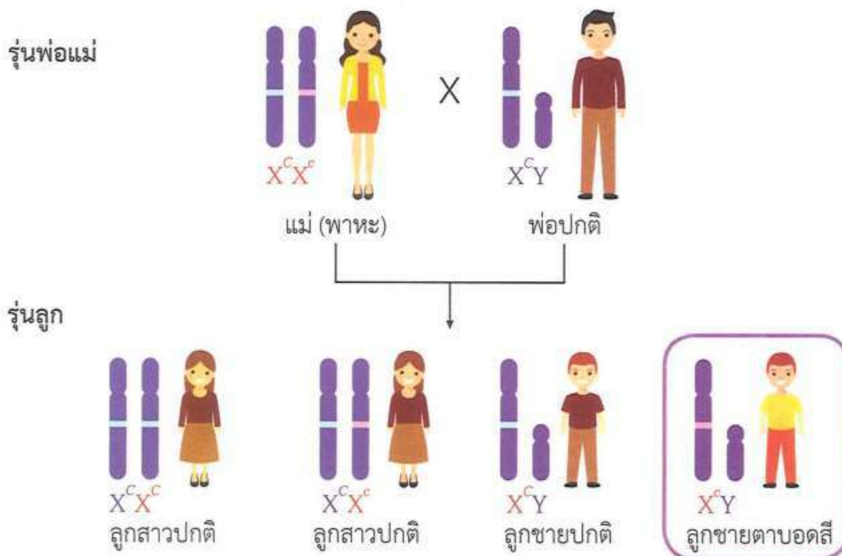
? หากในครอบครัวหนึ่งมีลูกสาวมีลักษณะตาบอดสีเขียว-แดง พ่อและแม่มีจีโนไทป์เป็นอย่างไรได้บ้าง



ความรู้เพิ่มเติม

การเขียนจีโนไทป์ของยีนบนโครโมโซมเพศ สามารถเขียนสัญลักษณ์แทนแอลลีลได้โดยเขียนโครโมโซมเพศ เช่น X หรือ Y และเขียนตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำหนดลักษณะนั้นกำกับ เช่น กำหนดให้ X^c แทนแอลลีลด้อยควบคุมลักษณะตาบอดสี (color blindness) ที่อยู่บนโครโมโซม X ส่วน X^C แทนแอลลีลลักษณะปกติ

จากพันธุประวัติ จะเห็นว่าผู้ชายคนที่ 1 และคนที่ 4 ในรุ่นที่ III มีตาบอดสี แสดงว่ามีจีโนไทป์ X^cY ดังนั้นผู้หญิงคนที่ 2 และคนที่ 4 ในรุ่นที่ II เป็นพาหะ (carrier) ซึ่งมีจีโนไทป์แบบเฮเทอโรไซกัส X^CX^c ซึ่งแม่ของผู้ชายที่มีตาบอดสีได้รับแอลลีลด้อยที่ควบคุมลักษณะตาบอดสี (X^c) มาจากพ่อ เมื่อผู้หญิงที่เป็นพาหะแต่งงานกับชายปกติจึงมีโอกาสที่จะมีลูกชายเป็นตาบอดสี ดังรูป 5.25 ทั้งนี้ในลักษณะด้อยที่ควบคุมโดยยีนที่มีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซมเพศ X นั้น ผู้หญิงที่เป็นพาหะจะไม่เป็นตาบอดสี แตกต่างจากเพศชายที่มีเพียงแอลลีลด้อยเพียงหนึ่งแอลลีลก็มีลักษณะตาบอดสี ดังนั้นในประชากรหนึ่งจึงมีโอกาสพบลักษณะตาบอดสีในเพศชายมากกว่าเพศหญิง



รูป 5.25 การถ่ายทอดลักษณะตาบอดสี

นอกจากลักษณะที่ควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซม X แล้ว ยังมีลักษณะที่ควบคุมด้วย**ยีนบนโครโมโซม Y** (Y-linked gene) ด้วย ซึ่งจะถ่ายทอดจากพ่อไปยังลูกชาย หลานชาย และถ่ายทอดต่อ ๆ ไปยังเพศชายทุกคนในครอบครัว ยีนบนโครโมโซม Y ส่วนใหญ่เป็นยีนที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลักษณะของเพศชาย และมียีนควบคุมลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเพศด้วย

จากการศึกษาข้างต้น จะเห็นได้ว่า การถ่ายทอดยีนที่อยู่บนโครโมโซมเพศเป็นการถ่ายทอดยีนที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล ซึ่งจะปรากฏลักษณะในเพศหนึ่งมากกว่าอีกเพศหนึ่ง ส่วนการถ่ายทอดยีนบนออโตโซมจะปรากฏลักษณะได้เท่า ๆ กันทั้งสองเพศ



รู้หรือไม่

การแสดงออกของยีนควบคุมลักษณะบางลักษณะจะมีความแตกต่างกันในแต่ละเพศ โดยอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น มีฮอร์โมนเพศเป็นตัวควบคุม ยกตัวอย่างเช่น ลักษณะศีรษะล้านที่ควบคุมด้วยยีนบนออโตโซม พบว่าเพศชายที่เป็นเฮเทอโรไซกัส (*BB′*) จะมีศีรษะล้าน ซึ่งแสดงฟีโนไทป์ต่างจากเพศหญิงที่เป็นเฮเทอโรไซกัสที่จะแสดงลักษณะศีรษะไม่ล้าน









กิจกรรมที่ 5.4 การแก้โจทย์ปัญหา เรื่องลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศ

จุดประสงค์

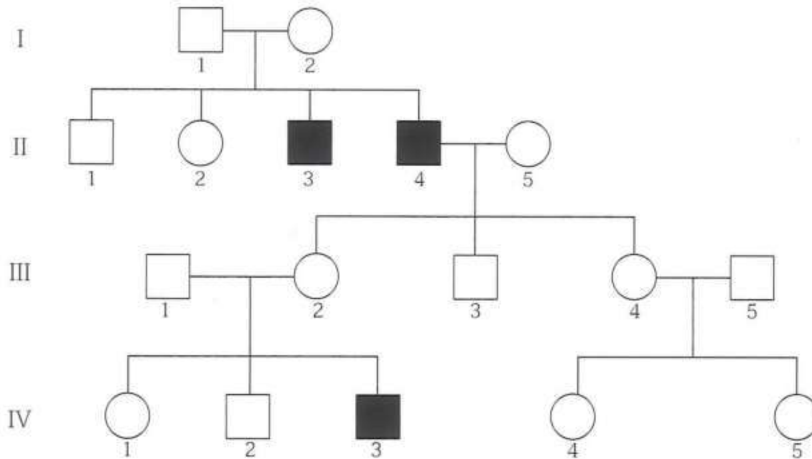
อธิบายการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมที่ควบคุมโดยยีนบนโครโมโซมเพศ

วิธีการทำกิจกรรม

ตอบคำถามจากโจทย์ปัญหาต่อไปนี้

1. หญิงตาปกติคนหนึ่งมีพ่อเป็นตาบอดสี แต่งงานกับชายตาปกติ ซึ่งมีพ่อเป็นตาบอดสี จงหาโอกาสของลูกที่จะเป็นตาบอดสี

2. จากพันธุประวัติแสดงการถ่ายทอดโรคฮีโมฟีเลียซึ่งเป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่ควบคุมโดยแอลลีลด้อยบนโครโมโซม X



2.1 จากพันธุประวัติมีบุคคลใดบ้างที่มีจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซกัสอย่างแน่นอน

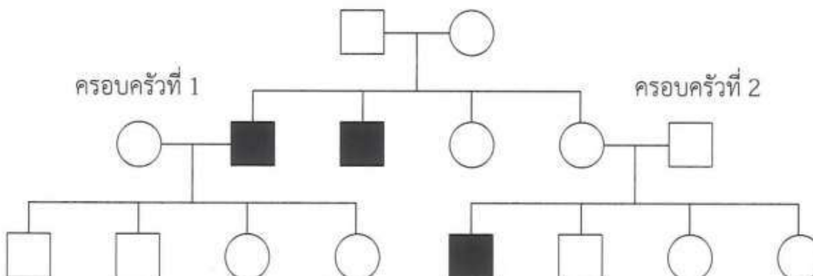
2.2 ถ้าบุคคลที่ 1 ในรุ่นที่ IV แต่งงานกับชายปกติ โอกาสที่ลูกจะแสดงลักษณะดังกล่าวเป็นเท่าใด

3. หญิงปกติคนหนึ่งแต่งงานกับชายที่เป็นโรคฮีโมฟิเลีย มีลูกสาวคนหนึ่งเป็นโรคฮีโมฟิเลีย

3.1 จีโนไทป์ของหญิงชายคู่นี้ และลูกสาวเป็นอย่างไร

3.2 โอกาสที่ลูกคนถัดไปจะเป็นเพศหญิงและเป็นโรคฮีโมฟิเลียเป็นเท่าใด

4. จากพันธุประวัติของครอบครัวหนึ่งที่มีประวัติเกี่ยวกับโรคฮีโมฟิเลีย



4.1 เพราะเหตุใดครอบครัวที่ 1 จึงมีลูกชายที่ไม่เป็นโรคฮีโมฟิเลีย

4.2 เพราะเหตุใดครอบครัวที่ 2 จึงมีลูกชายคนหนึ่งเป็นโรคฮีโมฟิเลีย

4.3 ลูกสาวของครอบครัวใดที่เป็นพาหะทุกคน เพราะเหตุใด

5.3 ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน

ลักษณะทางพันธุกรรมที่พบในสิ่งมีชีวิตแต่ละสปีชีส์มีหลายลักษณะ ยีนที่ควบคุมลักษณะเหล่านี้มีจำนวนมาก ในมนุษย์มียีนจำนวน 25,000 ยีน โดยประมาณ อยู่บนโครโมโซม 23 คู่ ดังนั้นแต่ละโครโมโซมจึงมียีนได้หลายร้อยยีนหรือหลายพันยีน **ยีนที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันจะถูกถ่ายทอดไปด้วยกันหรือไม่**

ในการแบ่งเซลล์เพื่อสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ยีนที่อยู่บนคนละคู่ฮอมอโลกัสโครโมโซมจะมีการรวมกลุ่มอย่างอิสระตามกฎของเมนเดล แต่กลุ่มยีนที่มีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซมเดียวกัน ถ้าอยู่ใกล้ชิดกันมากมักจะมีการถ่ายทอดไปพร้อม ๆ กัน เรียกว่า **ลิงเกจ** (linkage)

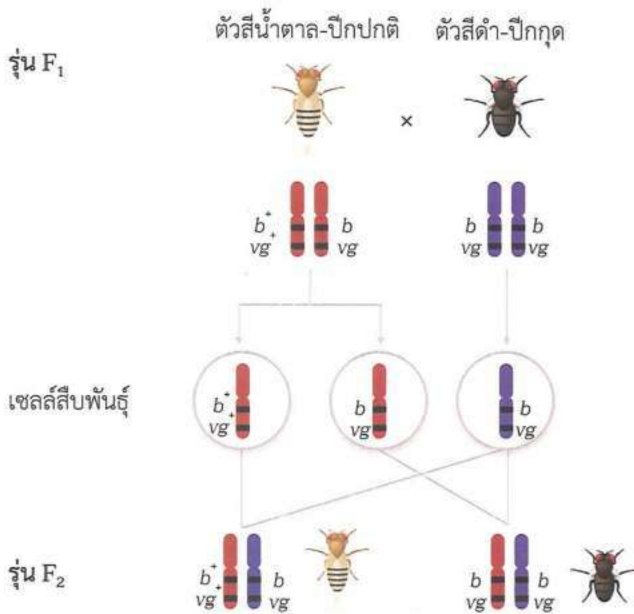
ตัวอย่างเช่น ในการผสมพันธุ์แมลงหวี่โดยพิจารณาสองลักษณะ คือ สีของลำตัว (สีน้ำตาลเป็นลักษณะเด่น และสีดำเป็นลักษณะด้อย) และลักษณะของปีก (ปีกปกติเป็นลักษณะเด่น และปีกกุดเป็นลักษณะด้อย) ดังรูป 5.26



ตัวสีน้ำตาล-ปีกปกติ ตัวสีดำ-ปีกปกติ ตัวสีดำ-ปีกกุด

รูป 5.26 ลักษณะสีของลำตัวและลักษณะของปีกของแมลงหวี่

หากเป็นไปตามกฎทั้งสองข้อของเมนเดล เมื่อผสมพันธุ์แมลงหวี่ตัวสีน้ำตาลปีกปกติพันธุ์แท้ ($b^+b^+vg^+vg^+$) กับแมลงหวี่ตัวสีดำปีกกุดพันธุ์แท้ (*bbvgvg*) ลูกรุ่น F_1 จะมีตัวสีน้ำตาลปีกปกติที่เป็นเฮเทอโรไซกัส (b^+bvg^+vg) และเมื่อนำรุ่น F_1 มาผสมกับแมลงหวี่ลำตัวสีดำปีกกุด จะได้รุ่น F_2 ที่มีตัวสีน้ำตาลปีกปกติ ตัวสีน้ำตาลปีกกุด ตัวสีดำปีกปกติ ตัวสีดำปีกกุด ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 : 1 ถ้ากำหนดให้ยีนที่ควบคุมลักษณะทั้งสองอยู่บนออโตโซมเดียวกัน และถ้ายีนทั้งสองเป็นลิงเกจกันมีการถ่ายทอดไปพร้อมกัน จะได้รุ่น F_2 ตัวสีน้ำตาลปีกปกติ และ ตัวสีดำปีกกุด ในอัตราส่วน 1 : 1 ดังรูป 5.27 ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองของเมนเดล



กำหนดให้
b^+ แทนแอลลีลเด่นที่ควบคุมตัวสีน้ำตาล
b แทนแอลลีลด้อยที่ควบคุมตัวสีดำ
vg^+ แทนแอลลีลเด่นที่ควบคุมปีกปกติ
vg แทนแอลลีลด้อยที่ควบคุมปีกกุด

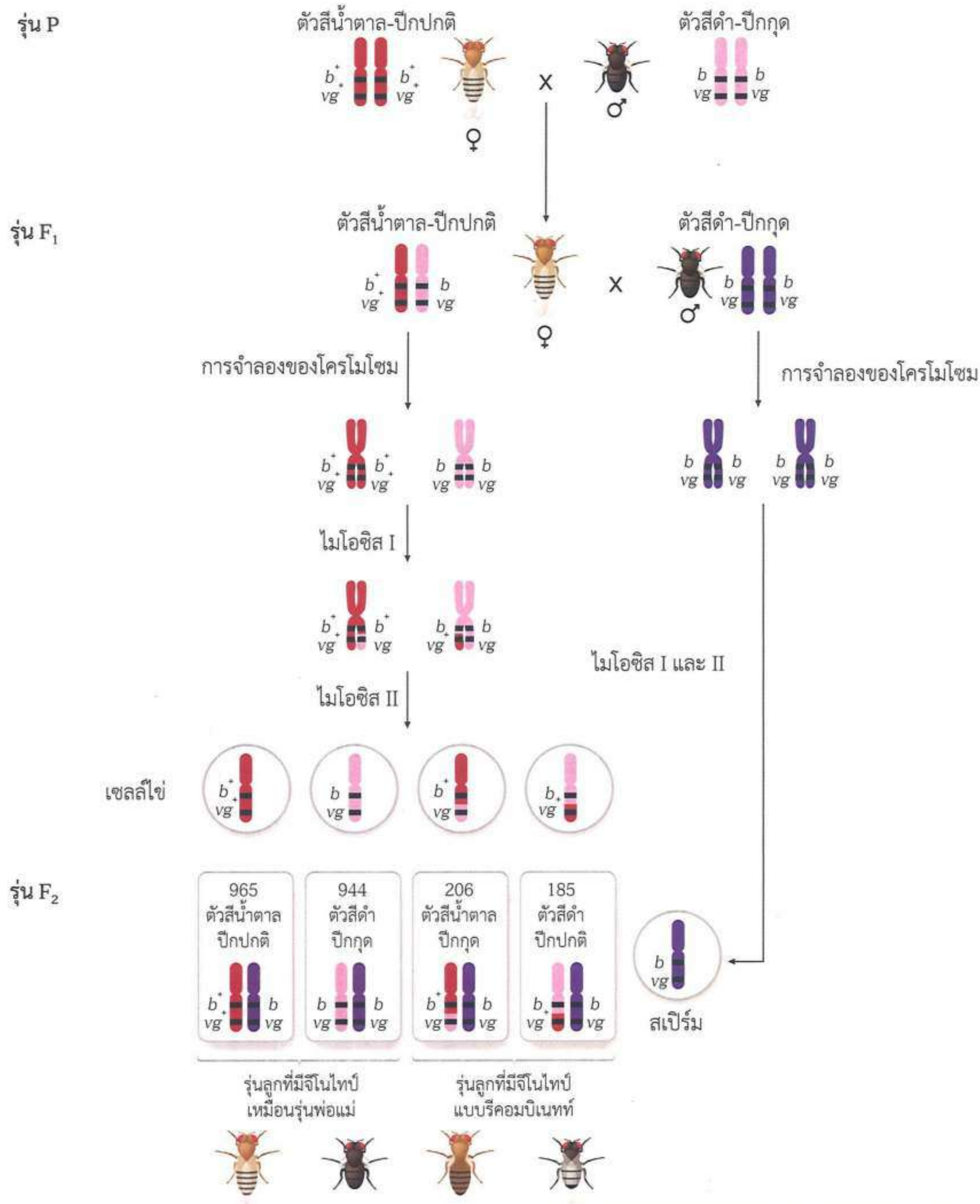
ตัวสีน้ำตาล-ปีกปกติ ตัวสีดำ-ปีกกุด

รูป 5.27 การถ่ายทอดยีนที่เป็นลิงเกจ

แต่จากการทดลองของมอร์แกน พบว่า รุ่น F_2 มีตัวสีน้ำตาลปีกปกติ ตัวสีน้ำตาลปีกกุด ตัวสีดำปีกปกติ ตัวสีดำปีกกุด เป็น 965 : 944 : 206 : 185 หรือในอัตราส่วนประมาณ 9 : 9 : 2 : 2 ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎของเมนเดล และไม่ตรงกับอัตราส่วนของลูกที่อาจเกิดขึ้นเมื่อยีนที่ควบคุมทั้ง 2 ลักษณะอยู่บนโครโมโซมเดียวกัน

จากการศึกษาพบว่ายีนสองยีนนี้เป็นลิงเกจกัน **ในกระบวนการแบ่งเซลล์มีเหตุการณ์ใดที่ทำให้เกิดการจัดกลุ่มใหม่ของแอลลีล และได้เซลล์สืบพันธุ์แบบ b^+vg และ bvg^+**

ตามที่นักเรียนได้ศึกษาเรื่องการแบ่งเซลล์มาแล้วว่า ในระหว่างการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส ฮอมอโลกัสโครโมโซมจะมาเข้าคู่กันในระยะโพรเฟส I โครโมโซมที่เข้าคู่กันจะเกิด**ครอสซิงโอเวอร์** (crossing over) แลกเปลี่ยนชิ้นส่วนโครมาทิด ซึ่งทำให้ยีนที่เคยถ่ายทอดไปด้วยกันบางส่วนแยกจากกันไปยังเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์ ทำให้เกิดเซลล์สืบพันธุ์จำนวนหนึ่งเป็น b^+vg และ bvg^+ เรียกการจัดกลุ่มใหม่ของยีนต่างตำแหน่งที่ทำให้ได้กลุ่มยีนที่ต่างไปจากพ่อหรือแม่ว่า **รีคอมบิเนชัน** (recombination) แต่เซลล์สืบพันธุ์ส่วนใหญ่จะเหมือนรุ่น P คือ b^+vg^+ และ bvg ซึ่งเซลล์สืบพันธุ์ที่มีการจัดกลุ่มใหม่ของยีนในรูปแบบใหม่นี้เอง จะมีผลทำให้เกิดการแปรผันทางพันธุกรรม เมื่อมีการปฏิสนธิลักษณะของลูกก็จะแปรผันแตกต่างกันไป ดังรูป 5.28



รูป 5.28 การถ่ายทอดยีนที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันและเกิดครอสซิงโอเวอร์ในแมลงหวี่

เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ยีนที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันมักจะถูกถ่ายทอดไปด้วยกัน แต่การเกิดครอสซิงโอเวอร์ในกระบวนการไมโอซิสอาจทำให้ยีนบนโครโมโซมเดียวกันแยกกันได้ ซึ่งการแลกเปลี่ยนระหว่างกลุ่มของยีนที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างยีน ถ้ายีนทั้ง 2 อยู่ชิดกันมากย่อมมีโอกาสแลกเปลี่ยนกันน้อย และยีนอยู่ห่างกันมากก็จะมีโอกาสมากขึ้น

สิ่งมีชีวิตมีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นต่อ ๆ ไปได้ ถึงแม้จะมีรูปแบบการถ่ายทอดลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปสามารถใช้กฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดลมาอธิบายหลักการถ่ายทอดได้ ความรู้ทางพันธุศาสตร์เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมและสารพันธุกรรมนั้นนับเป็นพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต วิวัฒนาการ รวมไปถึงการพัฒนาเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอที่นำไปประยุกต์ใช้ในด้านการแพทย์ การเกษตร และอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนจะได้ศึกษาในบทต่อไป



ตรวจสอบความเข้าใจ

? หมู่เลือดระบบ ABO ในมนุษย์ควบคุมด้วยยีนบนออโตโซม โรคตาบอดสีควบคุมด้วยแอลลีลด้อยบนโครโมโซมเพศ พ่อและแม่มีเลือดหมู่ A และตาปกติทั้งคู่ มีลูกชายคนหนึ่งมีเลือดหมู่ O และตาบอดสี พ่อแม่คู่นี้จะมีโอกาสให้กำเนิดลูกในกรณีต่อไปนี้เป็นเท่าใด

1. ลูกสาวมีเลือดหมู่ O และตาปกติ
2. ลูกชายมีเลือดหมู่ A และตาบอดสี



สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

1. หน่วยที่ควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมเรียกว่า ยีน รูปแบบของยีนเรียกว่า แอลลีล แอลลีลที่ควบคุมลักษณะต่าง ๆ อยู่ด้วยกันเป็นคู่ ซึ่งอาจเป็นแอลลีลเด่นเหมือนกันหรือแอลลีลด้อยเหมือนกัน มีจีโนไทป์เป็นฮอมอไซกัส ส่วนแอลลีลที่ต่างกันมีจีโนไทป์เป็นเฮเทอโรไซกัส

2. เมนเดลได้ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของถั่วลันเตา และสรุปเป็นกฎการแยกและกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ
   - กฎการแยกมีใจความว่า แอลลีลที่อยู่เป็นคู่จะแยกออกจากกันในระหว่างการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ โดยเซลล์สืบพันธุ์แต่ละเซลล์จะมีเพียงแอลลีลใดแอลลีลหนึ่ง
   - กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระมีใจความว่า หลังจากคู่ของแอลลีลแยกออกจากกัน แต่ละแอลลีลจะจัดกลุ่มอย่างอิสระกับแอลลีลของตำแหน่งอื่น ที่แยกออกจากคู่เช่นกันในการเข้าไปอยู่ในเซลล์สืบพันธุ์

3. การถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะให้อัตราส่วนฟีโนไทป์ที่แตกต่างจากผลการศึกษาของเมนเดล เรียกลักษณะเหล่านี้ว่า ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล เช่น ความเด่นไม่สมบูรณ์ ความเด่นร่วม มัลติเพิลแอลลีล การควบคุมด้วยยีนหลายคู่ และยีนบนโครโมโซมเพศ

4. ลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะมีความแตกต่างกันชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่อง ลักษณะทางพันธุกรรมบางลักษณะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยและลดหลั่นกันไป ควบคุมโดยยีนหลายคู่ ซึ่งเป็นลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง

5. โครโมโซมภายในเซลล์แบ่งเป็นออโตโซมและโครโมโซมเพศ ลักษณะทางพันธุกรรมส่วนใหญ่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซม บางลักษณะถูกควบคุมด้วยยีนบนโครโมโซมเพศ ซึ่งจะแสดงรูปแบบการถ่ายทอดที่แตกต่างจากยีนบนออโตโซม

6. เมื่อมีการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ ยีนที่อยู่บนโครโมโซมเดียวกันมักจะถูกถ่ายทอดไปด้วยกัน แต่การเกิดครอสซิงโอเวอร์ในกระบวนการไมโอซิสอาจทำให้ยีนในโครโมโซมเดียวกันแยกกันได้ เกิดการจัดกลุ่มใหม่ของยีนซึ่งทำให้เกิดการแปรผันทางพันธุกรรม



แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

1. จากแผนผังแสดงการสร้างเซลล์สืบพันธุ์และการปฏิสนธิของสิ่งมีชีวิตที่มีจีโนไทป์ ดังกำหนด



จงตอบคำถามต่อไปนี้

1.1 ขั้นตอนใดสัมพันธ์กับกฎการแยกของเมนเดล

1.2 ขั้นตอนใดสัมพันธ์กับกฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระของเมนเดล

2. จากตารางแสดงลักษณะทางพันธุกรรมของพืชชนิดหนึ่ง และตำแหน่งของแอลลีลที่ควบคุมแต่ละลักษณะบนคู่ของโครโมโซม เป็นดังนี้

ลักษณะทางพันธุกรรม	คู่โครโมโซมที่แอลลีลอยู่
ต้นสูง (*T*) /ต้นเตี้ย (*t*)	4
ขอบใบหยัก (*C*) / ขอบใบเรียบ (*c*)	7
ใบมีขน (*H*) / ใบไม่มีขน (*h*)	1
ก้านมีหนาม (*P*) / ก้านไม่มีหนาม (*p*)	4
กลีบดอกสีแดง (*R*) / กลีบดอกสีขาว (*r*)	1
ฝักอวบ (*F*) / ฝักแฟบ (*f*)	4
ฝักสีเขียว (*G*) ฝักสีเหลือง (*g*)	5

กำหนดให้พืชชนิดนี้ต้นหนึ่งมีลักษณะดังนี้ ต้นเตี้ย ขอบใบหยัก ใบมีขน ก้านไม่มีหนาม กลีบดอกสีแดง ฝักแฟบ ฝักสีเขียว โดยแอลลีลบนโครโมโซมคู่ที่ 1 เป็นแอลลีลเด่นทั้งหมด และแอลลีลบนโครโมโซมคู่ที่ 5 และ 7 เป็นเฮอเทอโรไซกัส

2.1 จงเขียนแผนภาพโครโมโซมที่แสดงตำแหน่งแอลลีลควบคุมลักษณะของพืชที่กำหนด

2.2 ต้นพืชที่กำหนดมีจีโนไทป์ควบคุม 7 ลักษณะนี้เป็นอย่างไร และจะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ได้กี่แบบ อะไรบ้าง ถ้าในกระบวนการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ไม่เกิดครอสซิงโอเวอร์

3. ลักษณะกลีบดอกของพืชชนิดหนึ่งมี 2 แบบ คือ ขอบกลีบดอกหยักและขอบกลีบดอกเรียบ ซึ่งควบคุมโดยยีนบนออโตโซม จากการผสมพันธุ์ต้นที่มีขอบกลีบดอกหยักและต้นที่มีขอบกลีบดอกเรียบในรุ่นที่ 1 จะได้เมล็ดซึ่งนำไปปลูกเป็นรุ่นที่ 2 นำต้นที่มีขอบกลีบดอกหยักในรุ่นที่ 2 ผสมกันเอง ได้เมล็ดซึ่งนำไปปลูกเป็นรุ่นที่ 3 ได้ผลดังตาราง

รุ่นที่	จำนวนต้น		
	ขอบกลีบดอกหยัก	ขอบกลีบดอกเรียบ	จำนวนทั้งหมด
1	52	48	100
2	280	0	280
3	240	80	320

3.1 ลักษณะขอบกลีบดอกของพืชชนิดนี้แบบใดเป็นลักษณะเด่น และแบบใดเป็นลักษณะด้อย

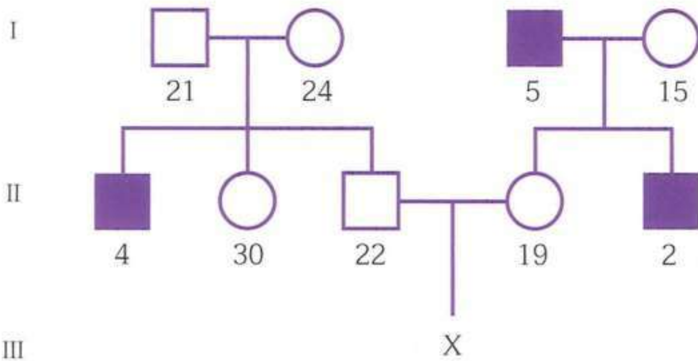
3.2 สามารถระบุจีโนไทป์ของแต่ละรุ่นได้อย่างแน่นอนหรือไม่ และระบุจีโนไทป์ได้ว่าอย่างไร

3.3 ถ้าต้องการผสมพันธุ์พืชชนิดนี้ให้ได้เมล็ดที่นำไปปลูกแล้วได้จำนวนต้นที่ขอบกลีบดอกหยักและขอบกลีบดอกเรียบใกล้เคียงกัน ควรถ่ายเรณูระหว่างต้นในรุ่นใด ลักษณะอย่างไร

4. กาแลคโตซีเมีย (galactosemia) เป็นโรคทางพันธุกรรมที่แสดงอาการตั้งแต่กำเนิดที่มีการถ่ายทอดโดยแอลลีลด้อยบนออโตโซม โดยมีอาการขาดเอนไซม์ galactose-1-phosphate uridyl transferase (GALT) ซึ่งในแต่ละจีโนไทป์จะมีระดับการทำงานของเอนไซม์ในเลือดแตกต่างกัน ดังตาราง

จีโนไทป์	ระดับการทำงานของเอนไซม์ GALT (หน่วย)
AA	28-40
Aa	12-27
aa	0-11

จากพันธุประวัติซึ่งแสดงระดับการทำงานของเอนไซม์ GALT ต่อไปนี้



4.1 ลูกของบุคคลที่ II-3 และ II-4 จะมีจีโนไทป์เป็นอย่างไรได้บ้าง และแต่ละแบบมีโอกาสเป็นเท่าใด

4.2 ถ้าลูกของบุคคลที่ II-3 และ II-4 คนหนึ่งแต่งงานกับบุคคลที่มีระดับการทำงานของเอนไซม์ GALT ประมาณ 20 หน่วย โอกาสที่จะมีลูกเป็นโรคกาแลคโตซีเมียเป็นเท่าใด

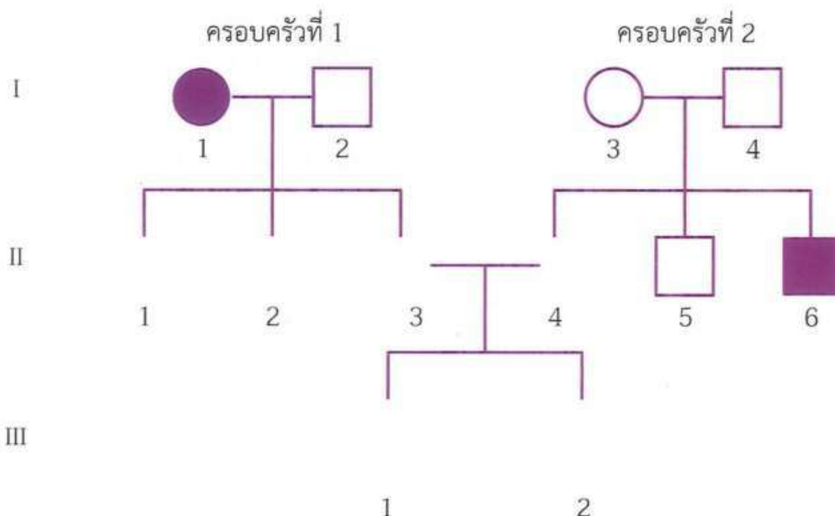
5. พืชชนิดหนึ่งมีทั้งต้นที่มีดอกสีขาว ต้นที่มีดอกสีแดง และต้นที่มีดอกสีชมพู โดยลักษณะสีดอกควบคุมด้วยยีนหนึ่งตำแหน่งซึ่งอยู่ในนิวเคลียส เมื่อนำต้นที่มีดอกสีแดงผสมพันธุ์กับต้นที่มีดอกสีขาว รุ่นลูกจะได้ต้นที่มีดอกสีชมพูทุกต้น
   5.1 สีของดอกในพืชชนิดนี้มีลักษณะการถ่ายทอดทางพันธุกรรมเป็นแบบใด
   5.2 ถ้าต้องการรุ่นลูกมีดอกสีแดงทุกต้น จะต้องผสมพันธุ์ระหว่างต้นพ่อและต้นแม่ที่มีดอกสีอะไร
   5.3 ถ้าต้องการรุ่นลูกที่มีทั้งต้นที่มีดอกสีขาว ต้นที่มีดอกสีแดง และต้นที่มีดอกสีชมพู จะต้องผสมพันธุ์ระหว่างต้นพ่อและต้นแม่ที่มีดอกสีอะไร
   5.4 ถ้าต้องการรุ่นลูกที่มีทั้งต้นที่มีดอกสีขาวและต้นที่มีดอกสีชมพู จะต้องผสมพันธุ์ระหว่างต้นพ่อและต้นแม่ที่มีดอกสีอะไร

6. ครอบครัวหนึ่งมีบุตร 4 คน ซึ่งมีเลือดหมู่ A B AB และ O ตามลำดับ จงหาว่าพ่อและแม่มีเลือดหมู่ใด และมีจีโนไทป์แบบใด

7. จากการศึกษาลักษณะทางพันธุกรรมในสัตว์ชนิดหนึ่ง ซึ่งลักษณะสีขนถูกควบคุมด้วยยีน 1 ตำแหน่ง โดยการทดลองที่ 1 นำตัวที่มีขนสีดำพันธุ์แท้ผสมกับสีส้มพันธุ์แท้ได้รุ่น F_1 ที่มีขนสีดำทุกตัว และการทดลองที่ 2 นำตัวที่มีขนสีน้ำตาลพันธุ์แท้ผสมกับตัวที่มีขนสีส้มพันธุ์แท้ ได้รุ่น F_1 ที่มีขนสีน้ำตาลทุกตัว ในการทดลองที่ 3 นำตัวที่มีขนสีดำ รุ่น F_1 จากการทดลองที่ 1 มาผสมกับตัวที่มีขนสีน้ำตาล รุ่น F_1 จากการทดลองที่ 2 ได้รุ่น F_2 ที่มีขนสีดำ 20 ตัว ขนสีน้ำตาล 10 ตัว ขนสีส้ม 10 ตัว
   7.1 จงกำหนดแอลลีลควบคุมลักษณะสีขนของสิ่งมีชีวิตในการทดลองนี้ พร้อมระบุว่าลักษณะสีขนของสิ่งมีชีวิตที่ได้จากการทดลองนี้เป็นการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมแบบใด แอลลีลที่ควบคุมลักษณะขนสีดำ น้ำตาล และส้ม มีการแสดงออกที่เท่ากันหรือไม่ อย่างไร พร้อมเขียนการถ่ายทอดลักษณะสีในการทดลองที่ 1 2 และ 3
   7.2 ถ้านำสิ่งมีชีวิตดังกล่าวสีดำพันธุ์แท้ผสมกับสีน้ำตาลพันธุ์แท้ จงระบุจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของรุ่น F_1
   7.3 ถ้านำสิ่งมีชีวิตดังกล่าวจากการทดลองที่ 2 ในรุ่น F_1 มาผสมกันเอง จงระบุจีโนไทป์และฟีโนไทป์ของรุ่นลูก

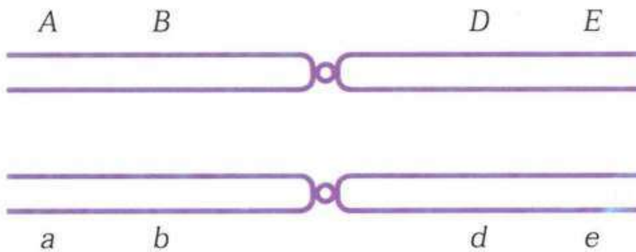
8. ในครอบครัวหนึ่งสามีภรรยาไม่เป็นโรคฮีโมฟิเลียมีลูกสาวและลูกชายซึ่งทั้งคู่ไม่เป็นโรคฮีโมฟิเลียเช่นกัน ต่อมาลูกสาวแต่งงานกับชายซึ่งไม่เป็นโรคฮีโมฟิเลีย แต่ให้กำเนิดลูกที่เป็นโรคและไม่เป็นโรคอย่างละหนึ่งคน ถ้าหากแอลลีลที่ควบคุมการเป็นโรคฮีโมฟิเลีย คือ แอลลีลด้อยซึ่งอยู่บนโครโมโซม X (X^h) และแอลลีลที่ควบคุมลักษณะไม่เป็นโรคคือแอลลีลเด่น (X^H) จงหาว่า
   8.1 สามีภรรยาคู่แรกมีจีโนไทป์เป็นอย่างไร
   8.2 ลูกของลูกสาวที่แสดงอาการเกิดโรคฮีโมฟิเลียคือลูกชายหรือลูกสาว และจีโนไทป์ของลูกคนดังกล่าวเป็นอย่างไร
   8.3 ถ้าลูกชายของสามีภรรยาคู่แรกแต่งงานกับผู้หญิงที่เป็นโรคฮีโมฟิเลียในบรรดาลูกชายที่เกิดมาจะมีโอกาสเป็นโรคนี้ร้อยละเท่าใด

9. ตาบอดสีควบคุมด้วยแอลลีลด้อยบนโครโมโซมเพศ (X^c) ครอบครัวที่ 1 มีลูกสาวสองคนและลูกชายหนึ่งคนตามลำดับ และครอบครัวที่ 2 มีลูกสาวปกติ ลูกชายตาปกติและลูกชายเป็นตาบอดสีตามลำดับ ถ้าลูกชายจากครอบครัวที่ 1 แต่งงานกับลูกสาวจากครอบครัวที่ 2 มีลูกสาวปกติและลูกชายเป็นตาบอดสีตามลำดับ
   9.1 จงเติมสัญลักษณ์ในพันธุประวัติของ 2 ครอบครัวนี้ให้สมบูรณ์
   กำหนดให้
   ○ แทนผู้หญิงปกติ □ แทนผู้ชายปกติ
   ● แทนผู้หญิงเป็นตาบอดสี ■ แทนผู้ชายเป็นตาบอดสี



9.2 ถ้าบุคคล II-3 และ II-4 มีลูกคนที่ 3 จะมีโอกาสเป็นลูกชายที่เป็นตาบอดสีร้อยละเท่าใด และมีโอกาสเป็นลูกสาวที่เป็นตาบอดสีร้อยละเท่าใด

10. จากแผนภาพโครโมโซมระบุตำแหน่งแอลลีล *A/a B/b D/d* และ *E/e*



การเกิดครอสซิงโอเวอร์ทำให้ยีนที่เคยถ่ายทอดไปด้วยกัน บางแอลลีลจะต้องแยกจากกัน ทำให้เซลล์สืบพันธุ์ที่ได้บางส่วนมีแอลลีลต่างไปจากปกติ จงวาดแผนภาพเพื่อแสดงตำแหน่งการเกิดครอสซิงโอเวอร์ซึ่งส่งผลให้ได้เซลล์สืบพันธุ์ต่อไปนี้

10.1 เซลล์สืบพันธุ์ที่มีแอลลีล *Abde*



10.2 เซลล์สืบพันธุ์ที่มีแอลลีล *abDE*



10.3 เซลล์สืบพันธุ์ที่มีแอลลีล *AbdE*



บทที่ 6 | เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ


goo.gl/zfPmXw



ปลาม้าลาย (*Danio rerio*) มีลักษณะลำตัวใส ด้านข้างลำตัวมีลายเป็นแถบ ซึ่งนิยมใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับพันธุกรรมและพัฒนาการของตัวอ่อน ในปัจจุบันสามารถใช้วิธีพันธุวิศวกรรมดัดแปรพันธุกรรมของปลาม้าลายทำให้ปลาม้าลายเรืองแสงได้ โดยการนำยีนที่ควบคุมการสร้างโปรตีนเรืองแสง เช่น โปรตีนเรืองแสงสีเขียว (green fluorescent protein; GFP) และโปรตีนเรืองแสงสีแดง (red fluorescent protein; RFP) จากแมงกะพรุนหรือดอกไม้ทะเลใส่ไปในจีโนมของปลาม้าลาย

การเรืองแสงเกิดจากยีนที่ใส่เข้าไปในจีโนมของปลาม้าลายนั้นสร้างโปรตีนเรืองแสงเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะเรืองแสงได้ นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรพันธุกรรมปลาม้าลายให้สร้างโปรตีนเรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยปัจจัยอื่น ๆ เช่น สารพิษชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ปลาม้าลายเรืองแสงเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสารพิษในแหล่งน้ำ ปลาม้าลายเรืองแสงนี้สามารถถ่ายทอดลักษณะเรืองแสงไปยังรุ่นลูกหลานได้ ในปัจจุบันมีการพัฒนาสายพันธุ์ของปลาม้าลายให้เรืองแสงได้ตลอดเวลาเพื่อนำมาเลี้ยงเป็นปลาสวยงาม ซึ่งได้รับการอนุมัติให้เพาะเลี้ยงและจำหน่ายได้ในบางประเทศ

นอกจากการทำให้ปลาม้าลายเรืองแสงแล้ว สามารถนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอไปประยุกต์ใช้ในด้านใดได้อีกบ้าง และเพราะเหตุใดจึงมีการอนุมัติให้เพาะเลี้ยงและจำหน่ายปลาม้าลายเรืองแสงได้ในบางประเทศเท่านั้น



คำถามสำคัญ

1. เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างไร

2. การใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านใดบ้าง



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูลและอธิบายหลักการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมและการสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
2. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายการโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรียและเทคนิค PCR
3. สืบค้นข้อมูลและอธิบายการหาขนาด DNA โดยใช้เทคนิคเจลอิเล็กโทรฟอรีซิส
4. สืบค้นข้อมูล ยกตัวอย่าง และอธิบายการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอในการสร้างผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ การวินิจฉัยหรือการตรวจกรองโรค และการรักษา
5. สืบค้นข้อมูลและยกตัวอย่างการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอสำหรับการปรับปรุงพันธุ์สิ่งมีชีวิตเพื่อใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม
6. สืบค้นข้อมูลและอธิบายการวิเคราะห์ลายพิมพ์ดีเอ็นเอในการใช้ประโยชน์ด้านนิติวิทยาศาสตร์และวิเคราะห์ STR
7. สืบค้นข้อมูลและอภิปรายเกี่ยวกับความปลอดภัยทางชีวภาพ และชีวจริยธรรมในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ



ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (√) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

◯ 1. พอลินิวคลีโอไทด์ 2 สายที่มาเข้าคู่กันใน DNA จะมีทิศทางตรงกันข้าม และมีลำดับเบสเป็นคู่สม

◯ 2. การจำลองดีเอ็นเอจะใช้เอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสและ DNA แต่ละสายเป็นแม่แบบ

◯ 3. การสร้าง DNA สายใหม่ จะสร้างจาก 5′ ไป 3′ โดยนิวคลีโอไทด์จะเติมที่ปลาย 3′ ของสายใหม่เสมอ

◯ 4. โครโมโซมของลูกมี 2 ชุด โดยได้รับโครโมโซม 1 ชุดจากพ่อและ 1 ชุดจากแม่ จึงสามารถหาความสัมพันธ์ของพ่อแม่ลูกได้

◯ 5. สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเกิดจากมนุษย์นำยีนจากสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งใส่ให้กับสิ่งมีชีวิตอีกชนิดหนึ่ง เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะตามต้องการ

◯ 6. สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมมีประโยชน์มากมาย การนำไปใช้จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

◯ 7. สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมต้องได้รับการควบคุมอย่างเข้มงวด จึงห้ามจำหน่ายสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมที่ยังมีชีวิตในทุกประเทศ

ในอดีตการปรับปรุงพันธุ์พืชและสัตว์ใช้วิธีคัดเลือกพ่อแม่พันธุ์ที่มีลักษณะที่ต้องการ เมื่อผสมพันธุ์กันแล้วจะได้ลูกที่มีลักษณะที่หลากหลาย ดังที่เคยศึกษามาแล้วจากเรื่องการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม จากนั้นจึงคัดเลือกลูกที่มีลักษณะตามต้องการ แต่การปรับปรุงพันธุ์ด้วยวิธีนี้ต้องใช้ระยะเวลานานเนื่องจากกว่าจะได้สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะตามต้องการนั้นจะต้องได้มาจากการผสมพันธุ์กันหลายรุ่น และมาจากพ่อแม่พันธุ์ที่เป็นสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันหรือใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้ลูกที่ไม่เป็นหมัน จึงไม่สามารถนำสิ่งมีชีวิตสปีชีส์อื่นที่มีลักษณะที่ต้องการมาผสมด้วยได้ **ถ้าต้องการปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสัตว์โดยใช้ระยะเวลาสั้นลงหรือทำให้สิ่งมีชีวิตมีลักษณะที่ต้องการแต่ไม่พบลักษณะนั้นในสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันหรือใกล้เคียงกัน จะทำได้อย่างไร**

ความรู้ทางด้านพันธุศาสตร์ระดับโมเลกุลมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอปรับแต่งยีนหรือเคลื่อนย้ายยีนข้ามชนิดของสิ่งมีชีวิตอย่างที่วิธีการตามธรรมชาติไม่สามารถทำได้ และใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอในการศึกษาจีโนมของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ทั้งจุลินทรีย์ พืช สัตว์ และมนุษย์ รวมทั้งการนำไปประยุกต์ในด้านอื่น ๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม และด้านนิติวิทยาศาสตร์

6.1 พันธุวิศวกรรมและการโคลนยีน

การตัดต่อและถ่ายยีนที่ต้องการเข้าสู่สิ่งมีชีวิต จะได้**สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม** (genetically modified organism; GMO) เรียกเทคนิคนี้ว่า **พันธุวิศวกรรม** (genetic engineering) ทำให้ได้สิ่งมีชีวิตที่มีสมบัติตามต้องการหรือมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

การสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมสามารถทำได้ทั้งในจุลินทรีย์ พืช และสัตว์ ซึ่งแบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดแรกที่ได้รับการดัดแปรพันธุกรรม โดยการนำยีนที่ควบคุมการสร้างอินซูลินของมนุษย์ใส่ในพลาสมิดเพื่อนำเข้าสู่เซลล์แบคทีเรีย

ในขั้นตอนการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมจะต้องมีการเพิ่มจำนวน DNA ที่เหมือน ๆ กัน เรียกว่า **การโคลนดีเอ็นเอ** (DNA cloning) และถ้า DNA บริเวณดังกล่าวเป็นยีนก็เรียกว่า **การโคลนยีน** (gene cloning) ซึ่งการเพิ่มจำนวน DNA ที่เหมือน ๆ กันอาจทำได้ในสิ่งมีชีวิต เช่น การโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรีย หรือทำได้ในหลอดทดลอง เช่น การเพิ่มจำนวน DNA ด้วยเทคนิค PCR

6.1.1 การโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรีย

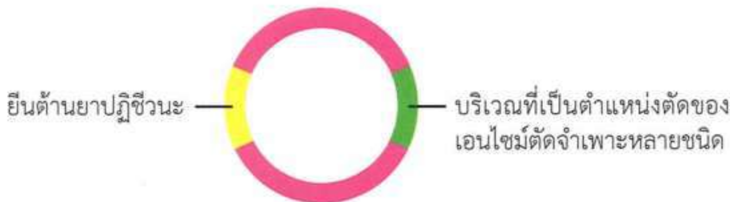
การโคลนยีนที่นิยมวิธีหนึ่งคือ การเพิ่มปริมาณยีนหรือ DNA ที่ต้องการโดยใช้**ดีเอ็นเอพาหะ**หรือ**เวกเตอร์** (vector) เช่น พลาสมิดของแบคทีเรีย ซึ่งตามธรรมชาติแล้วแบคทีเรียแต่ละเซลล์อาจมีพลาสมิดตั้งแต่หนึ่งถึงหลายร้อยพลาสมิด



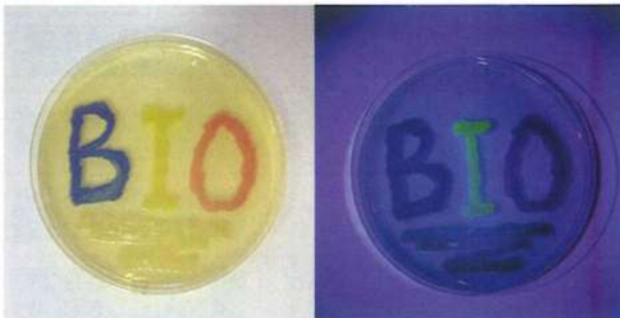
ความรู้เพิ่มเติม

พลาสมิดเป็น DNA สายคู่ ลักษณะเป็นวงอยู่แยกจากโครโมโซมของแบคทีเรีย พบได้ในเซลล์ของแบคทีเรียหลายชนิด มียีนที่เป็นประโยชน์ในการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย

มีการสร้างพลาสมิดที่มียีนต้านยาปฏิชีวนะ เช่น แอมพิซิลลิน เพื่อใช้ในการคัดเลือกเซลล์แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดเข้าไปในเซลล์ และพลาสมิดนี้จะมีบริเวณที่เหมาะสมต่อการแทรกสาย DNA ที่มียีนที่ต้องการ ซึ่งมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่สามารถตัดด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะหลายชนิด



เซลล์แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดนี้จะเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะ ซึ่งแบคทีเรียที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นกับยีนที่อยู่บนพลาสมิดที่แบคทีเรียได้รับ เช่น ยีนที่สร้างโปรตีนที่มีสีต่าง ๆ และยีนที่สร้างโปรตีนเรืองแสง ซึ่งโปรตีนจะเรืองแสงได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม



B มียีนที่สร้างโปรตีนสีน้ำเงิน
I มียีนที่สร้างโปรตีนเรืองแสงสีเหลือง
O มียีนที่สร้างโปรตีนสีชมพู

สำหรับเส้นที่ขีดใต้คำว่า BIO นั้นเป็นแบคทีเรียที่ได้รับเฉพาะพลาสมิดที่ไม่มียีนที่สร้างโปรตีน

การสร้าง**ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์** (recombinant DNA) อาจทำได้โดยการใช้**เอนไซม์ตัดจำเพาะ** (restriction enzyme) เพื่อตัดสาย DNA จากนั้นใช้เอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส เชื่อมสาย DNA ที่ถูกตัดแล้วกับ DNA ชิ้นอื่นให้มาต่อกันได้เป็นดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์

1.1 การตัดสาย DNA ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ

เอนไซม์ตัดจำเพาะจะตัดพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ภายในสาย DNA ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์จำเพาะ เอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิดจะจดจำและเข้าจับกับ DNA ในบริเวณที่มีลำดับเบสของนิวคลีโอไทด์จำเพาะ เรียกลำดับเบสนี้ว่า **บริเวณจดจำ** (recognition site) ซึ่งเอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะต่อลำดับเบสของ DNA แตกต่างกัน ดังตัวอย่างในรูป 6.1

5′...ATTGAAGCTTGCACTGAATTCCGTCGTGCAAGTCTCTGCAGATACGGATTGCTTAGGCCAGCTGCTAC...3′
3′...TAACTTCGAACGTGACTTAAGGCAGCACGTTCAGAGACGTCTATGCCTAACGAATCCGGTCGACGATG...5′

หมายถึงบริเวณจดจำ

รูป 6.1 บริเวณจดจำของเอนไซม์ตัดจำเพาะ 3 ชนิด บนสาย DNA

เอนไซม์ตัดจำเพาะซึ่งสร้างจากแบคทีเรียต่าง ๆ มีจำนวนมากนับพันชนิด เมื่อตัด DNA ที่ตำแหน่งตัดจำเพาะแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ดังตาราง 6.1

ตาราง 6.1 ตัวอย่างเอนไซม์ตัดจำเพาะ ลำดับเบสที่เป็นบริเวณจดจำ และตำแหน่งตัดจำเพาะ

เอนไซม์	แบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์	ลำดับเบสที่เป็นบริเวณจดจำและตำแหน่งตัดจำเพาะ (↓)	ผลิตภัณฑ์จากการตัดของเอนไซม์
*Eco*RI	*Escherichia coli* RY13	5′...G↓AATTC...3′ 3′...CTTAA↑G...5′	5′...G AATTC...3′ 3′...CTTAA G...5′
*Pst*I	*Providencia stuartii*	5′...CTGCA↓G...3′ 3′...G↑ACGTC...5′	5′...CTGCA G...3′ 3′...G ACGTC...5′
*Xma*I	*Xanthomonas malvacearum*	5′...C↓CCGGG...3′ 3′...GGGCC↑C...5′	5′...C CCGGG...3′ 3′...GGGCC C...5′
*Xcy*I	*Xanthamonas cyanopsidis*	5′...C↓CCGGG...3′ 3′...GGGCC↑C...5′	5′...C CCGGG...3′ 3′...GGGCC C...5′
*Sma*I	*Serratia marcescens*	5′...CCC↓GGG...3′ 3′...GGG↑CCC...5′	5′...CCC GGG...3′ 3′...GGG CCC...5′
*Hae*III	*Haemophilus aegypticus*	5′...GG↓CC...3′ 3′...CC↑GG...5′	5′...GG CC...3′ 3′...CC GG...5′

? บริเวณจดจำของเอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิด มีจำนวนเบสเท่ากันหรือไม่ อย่างไร

? การเรียงลำดับเบสของ DNA แต่ละสายในบริเวณจดจำของเอนไซม์ตัดจำเพาะ มีลักษณะร่วมกันอย่างไร

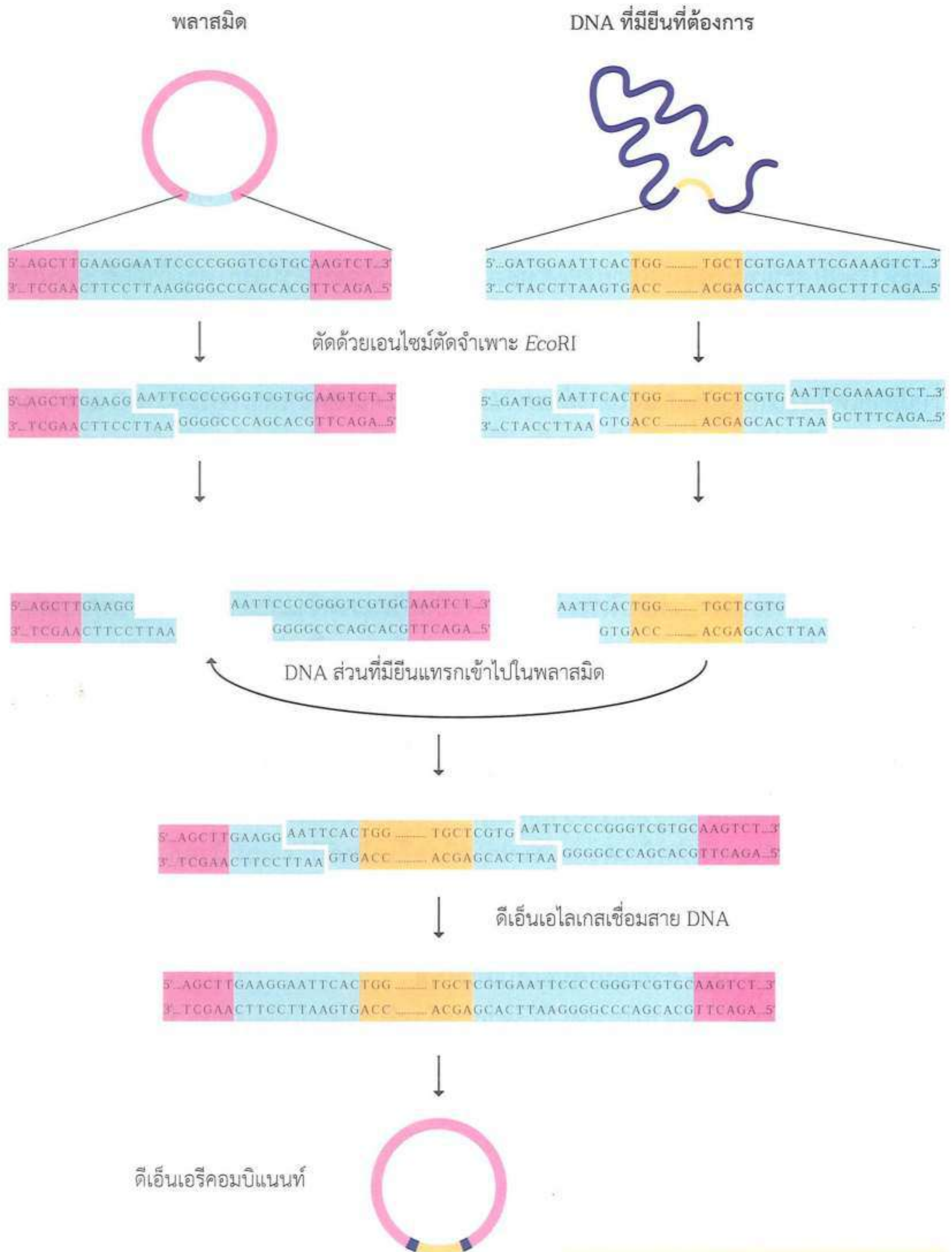
จากตารางจะเห็นว่าเอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิดมีบริเวณที่เป็นบริเวณจดจำและตำแหน่งตัดจำเพาะที่แตกต่างกัน เช่น เอนไซม์ *Eco*RI จะมีลำดับเบสจำเพาะในการจดจำจำนวน 6 คู่เบส ในขณะที่ *Hae*III จะมีเพียง 4 คู่เบส สาย DNA หลังจากถูกตัดแล้วจะมี 2 รูปแบบ เช่น ถ้าตัดด้วยเอนไซม์ *Eco*RI ซึ่งตำแหน่งตัดจำเพาะจะอยู่ระหว่างเบส G และ A จะทำให้ได้ปลายสายเดี่ยวทั้ง 2 ปลาย ที่รอยตัดของสาย DNA ซึ่งมีสายนิวคลีโอไทด์สายเดี่ยวยื่นออกมา เรียกปลายสาย DNA ที่เกิดขึ้นเช่นนี้ว่า **ปลายเหนียว** (sticky end) แต่ในกรณีของ *Hae*III มีตำแหน่งตัดจำเพาะอยู่ระหว่าง G และ C เมื่อตัดแล้วจะไม่เกิดปลายสาย DNA เป็นสายนิวคลีโอไทด์สายเดี่ยว เนื่องจากตำแหน่งตัดของสาย DNA ทั้งสองเส้นอยู่ตรงกันพอดี ปลายรอยตัด DNA เช่นนี้เรียกว่า **ปลายทู่** (blunt end)

แม้ว่าบริเวณจดจำและตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แต่มีเอนไซม์ตัดจำเพาะบางชนิดที่มีบริเวณลำดับเบสที่เป็นบริเวณจดจำและตำแหน่งตัดจำเพาะเหมือนกัน เช่น *Xma*I และ *Xcy*I มีบริเวณจดจำและตำแหน่งตัดจำเพาะเป็น 5′-C↓CCGGG-3′

อย่างไรก็ตามเอนไซม์ตัดจำเพาะบางชนิดมีบริเวณลำดับเบสที่เป็นบริเวณจดจำเหมือนกัน เช่น *Xma*I และ *Sma*I แต่ตัด DNA ที่ตำแหน่งตัดจำเพาะต่างกัน ทำให้ได้ DNA ที่มีปลายต่างกัน เช่น *Xma*I มีตำแหน่งตัดจำเพาะอยู่ระหว่างนิวคลีโอไทด์ที่ 1 และนิวคลีโอไทด์ที่ 2 ดังนี้ 5′-C↓CCGGG-3′ ขณะที่ *Sma*I มีตำแหน่งตัดจำเพาะอยู่ระหว่างนิวคลีโอไทด์ที่ 3 และนิวคลีโอไทด์ที่ 4 ดังนี้ 5′-CCC↓GGG-3′

1.2 การเชื่อมสาย DNA ด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส

เอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกสสามารถเร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ระหว่างปลายสาย DNA สองปลายให้เชื่อมต่อกันได้ เช่น การเชื่อมต่อชิ้น DNA ภายในสายแลกกิงสแทรนด์ให้เป็น DNA สายเดียวในการจำลองดีเอ็นเอ ในการสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์นั้นก็มีการใช้เอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกสเช่นเดียวกัน โดยอาจตัด DNA สองโมเลกุลด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะชนิดเดียวกัน แล้วเชื่อมต่อ DNA สองโมเลกุลนั้นด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกส เช่น การตัดและเชื่อมต่อพลาสมิดและ DNA ที่มียีนที่ต้องการได้เป็นดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ ดังรูป 6.2

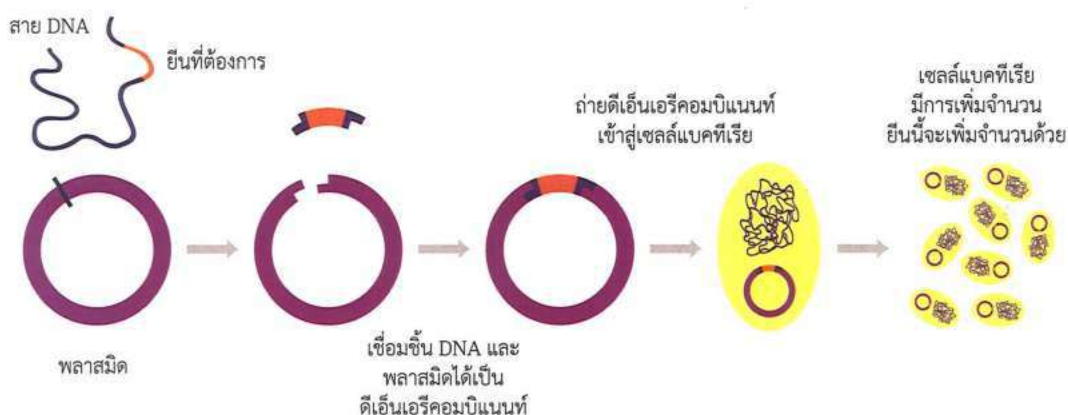


รูป 6.2 การสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์

ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ในรูปของพลาสมิดซึ่งมี DNA ที่ต้องการแทรกอยู่นั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จะต้องมีวิธีการที่จะให้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์คงอยู่และเพิ่มจำนวนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.3 การถ่ายดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์เข้าสู่เซลล์แบคทีเรียและคัดเลือกเซลล์ที่ต้องการ

เมื่อได้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์แล้วจะต้องนำไปเพิ่มจำนวนโดยการถ่ายดีเอ็นเอรีรีคอมบิแนนท์เข้าสู่เซลล์แบคทีเรียและคัดเลือกเซลล์ที่ต้องการ เซลล์แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดจะเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะ เมื่อแบคทีเรียแบ่งเซลล์ พลาสมิดจะจำลองตัวเองและถ่ายทอดไปยังเซลล์ลูกทั้งสองเซลล์ได้ ดังนั้นเมื่อนำแบคทีเรียที่ได้รับดีเอ็นเอรีรีคอมบิแนนท์ไปเลี้ยงเพื่อเพิ่มจำนวน DNA ที่ต้องการซึ่งแทรกอยู่ในพลาสมิดก็จะเพิ่มจำนวนด้วย ดังรูป 6.3



รูป 6.3 การโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรีย

การโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรียจะทำให้ได้ยีนที่ต้องการปริมาณมากเพื่อนำไปใช้ศึกษาด้านต่าง ๆ เช่น ศึกษาว่ามียีนอะไรและควบคุมการสร้างโปรตีนชนิดใด หรือเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตโปรตีนที่ต้องการ เช่น อินซูลิน วัคซีน หรือยารักษาโรคต่าง ๆ ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไปในหัวข้อ 6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ



กิจกรรม 6.1 การสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์

จุดประสงค์

1. อธิบายหลักการตัด DNA ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะและการสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
2. อธิบายความแตกต่างของเซลล์แบคทีเรียที่ได้รับและไม่ได้รับดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์

วัสดุและอุปกรณ์

1. กระดาษสีเหลืองและสีฟ้า (หรือกระดาษที่มีสีต่างกัน)
2. ปากกา
3. เทปใสติดกระดาษ
4. กรรไกร
5. ถุงทึบ
6. ถาดกระดาษ

วิธีการทำกิจกรรม

1. ตัดกระดาษสีเหลืองให้มีขนาดกว้าง 3 cm และยาว 30 cm จำนวน 10 ชิ้น เขียนลำดับเบสที่กำหนดลงบนกระดาษสีเหลืองสำหรับเป็นพลาสมิดที่มียีนต้านยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลิน (amp^R)

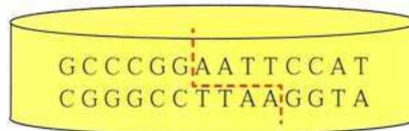
   ...GCCCGGAATTCCATCTGCAGCTGCAGCCCGGGAT...
   ...CGGGCCTTAAGGTAGACGTCGACGTCGGGCCCTA... amp^R

2. ตัดกระดาษสีฟ้าให้มีขนาดกว้าง 3 cm และยาว 20 cm จำนวน 10 ชิ้น เขียนลำดับเบสที่กำหนดลงบนกระดาษสีฟ้าสำหรับเป็น DNA ที่มียีนที่ควบคุมการสร้างสารที่ต้องการ

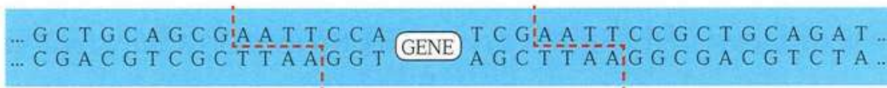
   ...GCTGCAGCGAATTCCA (GENE) TCGAATTCCGCTGCAGAT...
   ...CGACGTCGCTTAAGGT (GENE) AGCTTAAGGCGACGTCTA...

(สามารถ download ใบกิจกรรมของพลาสมิดและ DNA ที่มีลำดับเบสได้จาก QR code ของบท)

3. นำกระดาษสีเหลืองที่เป็นพลาสมิดแต่ละชิ้น ม้วนติดกันเป็นวงกลมด้วยเทปใส ได้พลาสมิดวงกลมจำนวน 10 ชิ้นจากนั้นใช้กรรไกรตัดกระดาษตรงตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Eco*RI (รอยประสีแดง)



4. ใช้กรรไกรตัดกระดาษสีฟ้าจำนวน 10 ชิ้น ตรงตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Eco*RI (รอยประสีแดง) นำกระดาษส่วนที่มียีนที่ต้องการไปใช้ต่อในข้อ 5



5. นำกระดาษทั้ง 20 ชิ้น ใส่ลงในถุงทึบ เขย่าให้กระจาย แล้วหยิบทีละ 2 ชิ้น จำนวน 10 ครั้ง
   - ถ้าได้ชิ้นสีฟ้า 1 ชิ้นและสีเหลือง 1 ชิ้น ให้นำกระดาษสีฟ้าต่อเข้ากับกระดาษสีเหลือง แล้วต่อกระดาษเป็นวง
   - ถ้าได้ชิ้นสีฟ้า 2 ชิ้น ให้ต่อกระดาษสีฟ้าเข้าด้วยกันแล้วต่อกระดาษเป็นวง
   - ถ้าได้ชิ้นสีเหลือง 2 ชิ้น ให้ต่อกระดาษแต่ละชิ้นเป็นวงเหมือนเดิม

6. นำชิ้นกระดาษที่ได้จากข้อ 5 ใส่ลงในถุงทึบ แล้วสุ่มหยิบ 1 ชิ้นนำไปวางลงในถาดกระดาษที่สมมติให้เป็นเซลล์แบคทีเรียเจ้าบ้าน จากนั้นสุ่มหยิบครั้งที่ 2 แล้วนำไปใส่ถาดกระดาษอีกถาดหนึ่ง สุ่มหยิบจนครบ 5 ครั้ง

คำถามท้ายกิจกรรม

? ถ้านำเซลล์แบคทีเรียจำนวน 5 เซลล์ที่ได้จากการทำกิจกรรมไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลิน จะมีเซลล์จำนวนเท่าใดที่เจริญได้

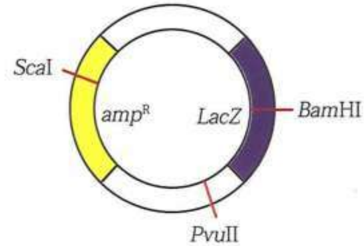
? เพราะเหตุใดแบคทีเรียบางเซลล์จึงไม่สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะ

? เซลล์ที่เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลินนั้น จะมีเซลล์จำนวนเท่าใดที่สามารถสร้างสารที่ต้องการได้ เพราะเหตุใด

? ถ้าไม่มีเอนไซม์ *Eco*RI จะสามารถใช้เอนไซม์ตัดจำเพาะชนิดใดได้ในการสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ เพราะเหตุใด



กรณีศึกษา



พลาสมิดมีตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Sca*I ภายในยีนต้านทานยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลิน (amp^R) และมีตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Bam*HI ภายในยีน *LacZ* ซึ่งยีน *LacZ* นี้จะควบคุมการสร้างเอนไซม์ที่สามารถย่อยสารตั้งต้นจากไม่มีสีได้เป็นสีฟ้า เมื่อนำแบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดที่มียีนนี้ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารตั้งต้นจะทำให้กลุ่มของแบคทีเรียหรือโคโลนีซึ่งปกติมีสีขาวเปลี่ยนเป็นสีฟ้า แต่ถ้ามีชิ้น DNA แทรกเข้าไปในพลาสมิดตรงตำแหน่งยีนจะทำให้ยีนนั้นไม่ทำงาน เช่น ถ้ามี DNA แทรกเข้าไปในยีน *LacZ* จะทำให้ยีนนี้ไม่สามารถสร้างเอนไซม์ออกมาย่อยสารตั้งต้นได้ โคโลนีของแบคทีเรียจึงเป็นสีขาว



พลาสมิดที่มี DNA แทรกบริเวณยีน *LacZ* ถูกใส่เข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย

พลาสมิดที่ไม่มี DNA แทรกบริเวณยีน *LacZ* ถูกใส่เข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย



ไม่มีการแสดงออกของยีน *LacZ* และแบคทีเรียไม่สร้างเอนไซม์

มีการแสดงออกของยีน *LacZ* และแบคทีเรียสร้างเอนไซม์ได้

ไม่มีเอนไซม์ย่อยสารตั้งต้น ทำให้มองเห็นโคโลนีของแบคทีเรียเป็นสีขาว



เอนไซม์ย่อยสารตั้งต้นได้สารสีฟ้า ทำให้มองเห็นโคโลนีของแบคทีเรียเป็นสีฟ้า

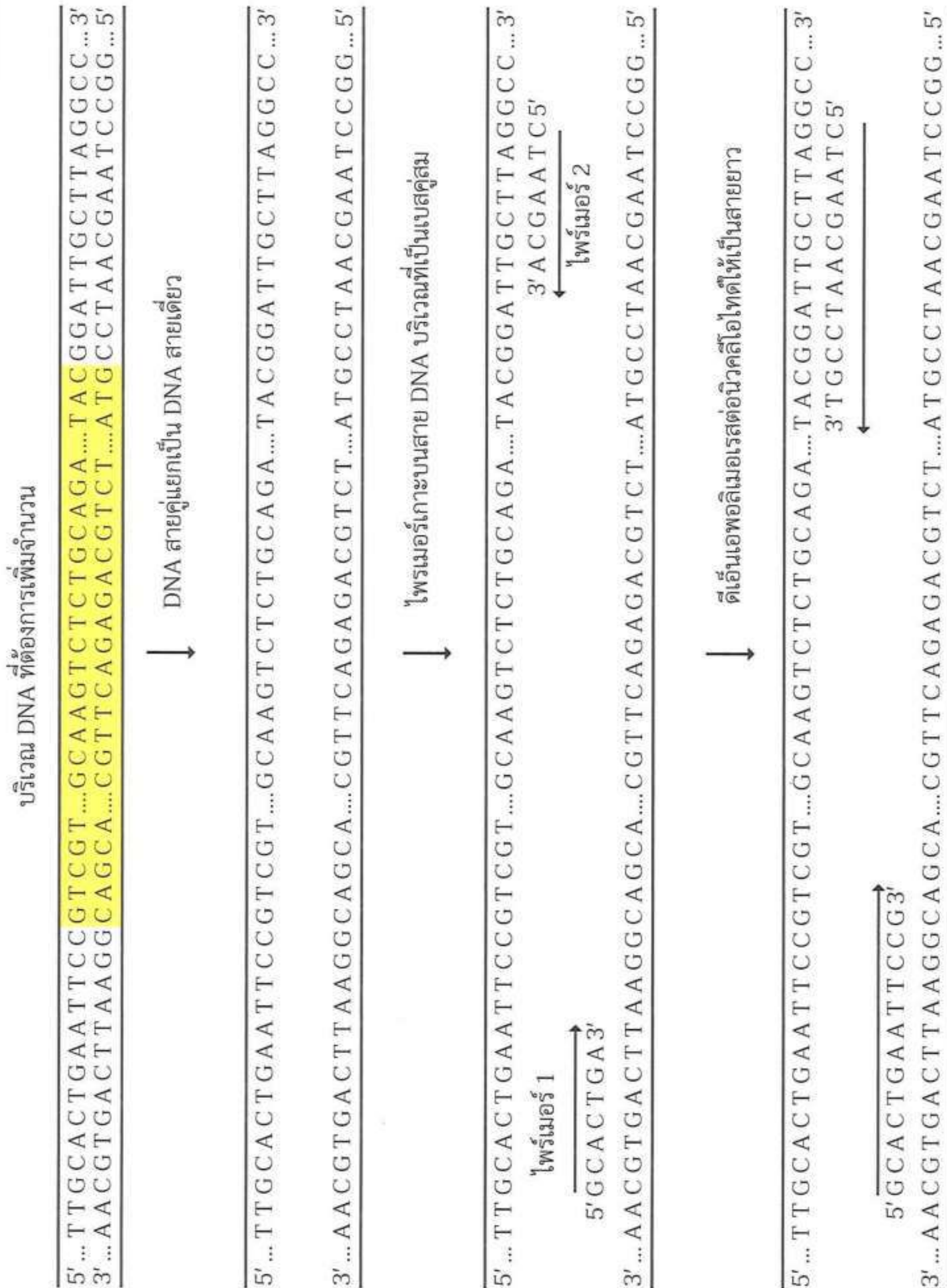
ถ้าตัดพลาสมิดและ DNA ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะชนิดต่าง ๆ แล้วนำมาเชื่อมกัน จากนั้นนำแบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดแบบต่าง ๆ ไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มียาปฏิชีวนะแอมพิซิลลินและสารตั้งต้น ให้เติมข้อมูลลงในช่องว่างของตาราง

	ตัดพลาสมิดด้วยเอนไซม์	ใส่ชิ้น DNA ที่ตัดด้วยเอนไซม์	การเจริญของแบคทีเรียที่ได้รับดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแอมพิซิลลิน	สีของโคโลนีแบคทีเรียที่ได้รับดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
ก.	*Sca*I	*Sca*I		
ข.	*Pvu*II	*Pvu*II		
ค.	*Bam*HI	*Bam*HI		
ง.	*Sca*I	-		

6.1.2 การเพิ่มจำนวน DNA ด้วยเทคนิค PCR

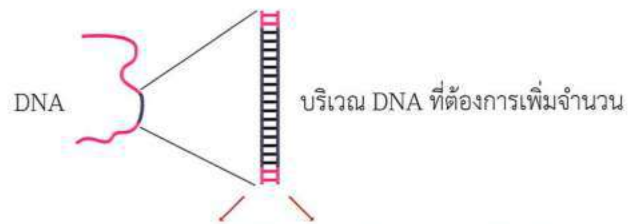
นอกจากการโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดแล้ว ยังสามารถเพิ่มจำนวนของ DNA ในหลอดทดลองได้ด้วยเทคนิค**พอลิเมอเรสเชนรีแอกชัน**หรือ**พีซีอาร์** (polymerase chain reaction; PCR) ด้วย**เครื่องเทอร์มัลไซเคลอร์** (thermal cycler) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้ปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็วตามความต้องการ

การเกิดปฏิกิริยาในหลอดทดลองอาศัย**ไพรเมอร์** (primer) ที่เป็น DNA สายสั้น ๆ เกาะกับ**ดีเอ็นเอแม่แบบ** (DNA template) ในบริเวณที่ต้องการเพิ่มจำนวน โดยไพรเมอร์จะมีลำดับเบสที่เป็นเบสคู่สมกับลำดับเบสบนสายแม่แบบจึงสามารถเกาะกับดีเอ็นเอแม่แบบได้อย่างจำเพาะ ตำแหน่งที่ไพรเมอร์เกาะจะเป็นจุดเริ่มต้นและกำหนดบริเวณของการสร้างสาย DNA จากนั้นเอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสทำหน้าที่ต่อนิวคลีโอไทด์ทั้ง 4 ชนิด ให้ได้เป็น DNA สายยาว โดยที่นิวคลีโอไทด์ที่นำมาต่อจะมีเบสที่เป็นเบสคู่สมกับดีเอ็นเอแม่แบบ ดังรูป 6.4



รูป 6.4 การเกิดปฏิกิริยา PCR

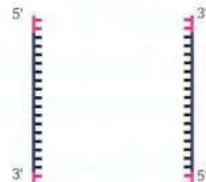
ขั้นตอนการเพิ่มปริมาณ DNA นั้น ภายในหลอดทดลองจะมีดีเอ็นเอแม่แบบ ไพรเมอร์ นิวคลีโอไทด์ 4 ชนิด และเอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสละลายอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ เพื่อให้เกิดภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยา PCR มีขั้นตอนดังรูป 6.5



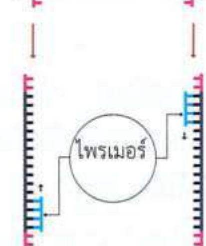
รอบที่ 1

ได้ DNA ส่วนที่ต้องการ 2 โมเลกุล

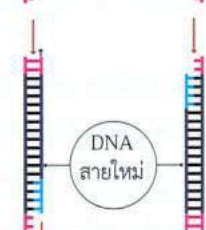
1. เพิ่มอุณหภูมิให้สูง 95 °C ทำให้ดีเอ็นเอแม่แบบ 2 สายแยกออกจากกันเป็นสายเดี่ยว



2. ลดอุณหภูมิลงที่ 50 - 60 °C ทำให้ไพรเมอร์จับกับสายดีเอ็นเอแม่แบบในบริเวณที่ต้องการเพิ่มจำนวน

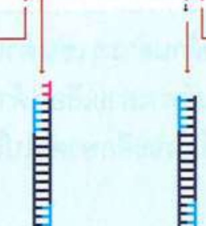


3. ปรับอุณหภูมิไปที่ 72 °C ซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของดีเอ็นเอพอลิเมอเรส ทำให้เกิดการจำลองสาย DNA ในบริเวณที่ต้องการ



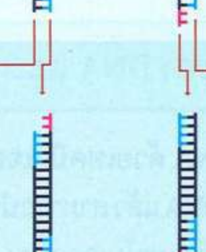
รอบที่ 2

ได้ DNA ส่วนที่ต้องการ 4 โมเลกุล



รอบที่ 3

ได้ DNA ส่วนที่ต้องการ 8 โมเลกุล



รูป 6.5 ขั้นตอนการเพิ่มปริมาณ DNA โดยเทคนิค PCR

? จำนวนรอบของ PCR และจำนวนโมเลกุล DNA ที่ได้ มีความสัมพันธ์กันอย่างไร และถ้าเริ่มต้นปฏิกิริยาจาก DNA 1 โมเลกุล เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยารอบที่ 10 จะได้ DNA กี่โมเลกุล



ความรู้เพิ่มเติม

เอนไซม์ดีเอ็นเอพอลิเมอเรสที่ใช้ในเทคนิค PCR สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ สกัดมาจากแบคทีเรียซึ่งอาศัยอยู่ในน้ำพุร้อน โดยเอนไซม์นี้จะไม่เสียสภาพเมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการแยกดีเอ็นเอแม่แบบสายคู่ให้เป็นสายเดี่ยว จึงยังสามารถทำงานเพื่อให้เกิดการจำลองสาย DNA ในการทำปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มและลดอุณหภูมิซ้ำหลาย ๆ ครั้งได้

เทคนิค PCR เป็นการสังเคราะห์สาย DNA ซ้ำ ๆ ประมาณ 25-40 รอบ ตามที่กำหนด โดยสาย DNA ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบจะถูกใช้เป็นดีเอ็นเอแม่แบบในการสังเคราะห์ DNA สายใหม่ในรอบต่อ ๆ ไปจนสิ้นสุดปฏิกิริยา ทำให้ได้โมเลกุล DNA ส่วนที่ต้องการหลายล้านโมเลกุล โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยา PCR เป็นการเพิ่มจำนวน DNA บางบริเวณ ไม่ได้ครอบคลุมทั้งสายของดีเอ็นเอแม่แบบ

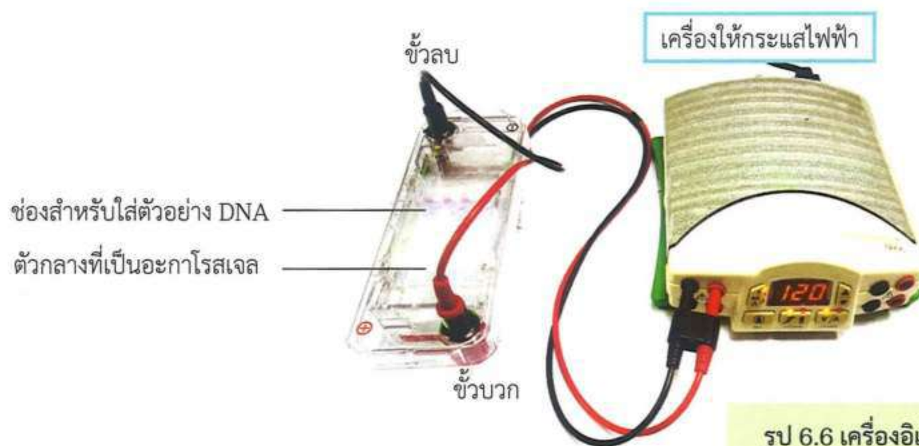
การเพิ่มปริมาณ DNA ด้วย PCR มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ DNA จำนวนมากเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ เช่น เป็นแหล่งของยีนสำหรับการโคลนยีนโดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรีย หรือตรวจสอบยีนที่แทรกในพลาสมิดของเซลล์แบคทีเรียที่ได้จากการโคลนยีนนั้นเป็นยีนที่ใส่เข้าไปหรือไม่ โดยนำผลิตภัณฑ์ PCR ไปหาขนาดหรือหาลำดับนิวคลีโอไทด์ต่อไป หรือเพิ่มปริมาณ DNA สำหรับการตรวจสอบ DNA เพื่อประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านนิติวิทยาศาสตร์ใช้ตรวจหลักฐานในคดีอาชญากรรม หรือการตรวจหาความสัมพันธ์ทางสายเลือด ด้านการแพทย์ใช้ตรวจหาโรคทางพันธุกรรมรวมทั้งโรคที่เกิดจากการติดเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจะศึกษาต่อไปในหัวข้อ 6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

6.2 การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์

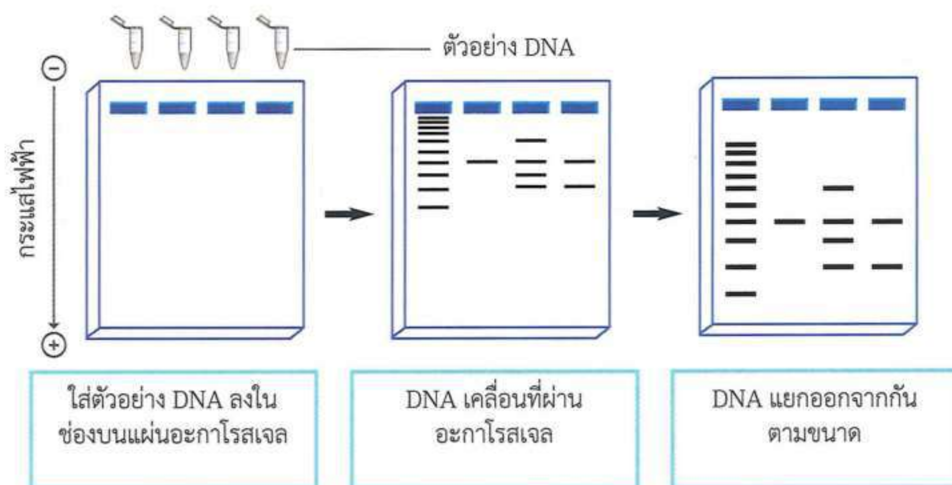
6.2.1 การหาขนาด DNA ด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโทรฟอรีซิส

เมื่อเพิ่มจำนวน DNA แล้ว สามารถนำมาหาขนาดของ DNA ได้ด้วยเทคนิค**เจลอิเล็กโทรฟอรีซิส** (gel electrophoresis) ซึ่งแยกโมเลกุลของ DNA ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากกันในสนามไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่มีลักษณะเป็นวุ้นที่มีรูพรุน นอกจากนี้ยังสามารถใช้แยกและศึกษาโมเลกุลของโปรตีนได้อีกด้วย

เทคนิคเจลอิเล็กโทรฟอรีซิสทำได้โดยให้โมเลกุล DNA เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เช่น **อะกาโรสเจล** (agarose gel) และ**พอลิอะคริลาไมด์เจล** (polyacrylamide gel) ที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังรูป 6.6 โมเลกุลของ DNA เป็นโมเลกุลที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกโดยผ่านไปตามรูพรุนของตัวกลาง โดยที่โมเลกุล DNA ที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนในวุ้นได้เร็วกว่าโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ โมเลกุล DNA ขนาดต่าง ๆ จึงแยกออกจากกันภายใต้สนามไฟฟ้า ส่วนโมเลกุล DNA ที่มีขนาดเดียวกันจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่ากัน ดังรูป 6.7



รูป 6.6 เครื่องอิเล็กโทรฟอรีซิส

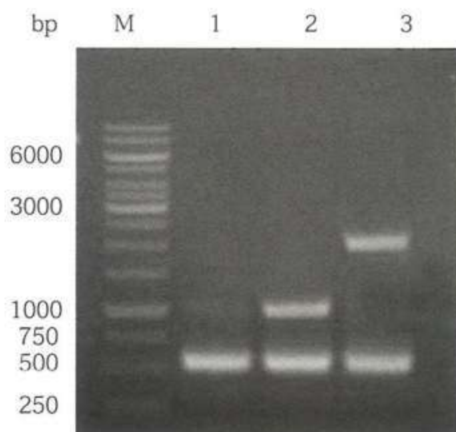


รูป 6.7 โมเลกุล DNA เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นอะกาโรสเจล

DNA ที่อยู่ในรูปสารละลายจะมีลักษณะใส ไม่มีสี จึงไม่สามารถมองเห็นได้ ต้องอาศัยการย้อมสีในการตรวจสอบ DNA สามารถใช้สีย้อมได้หลายชนิด เช่น **อีธิเดียมโบรไมด์** (ethidium bromide) ซึ่งจะจับกับโมเลกุล DNA จากนั้นนำไปส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเลตจะเกิดการเรืองแสง บริเวณที่โมเลกุล DNA ขนาดเท่ากันเคลื่อนที่ไปอยู่ด้วยกันจำนวนมากจะมองเห็นเป็น**แถบ** (band)

การหาขนาดของ DNA สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบกับโมเลกุลดีเอ็นเอมาตรฐาน (DNA marker; M) ซึ่งประกอบด้วยชิ้น DNA ที่ทราบขนาดเป็นจำนวนคู่เบส (base pair; bp) จะทำให้ทราบขนาดโมเลกุลของ DNA ที่ต้องการศึกษาได้ ดังรูป 6.8

? ตัวอย่างในแถวที่ 2 มีแถบโมเลกุล DNA กี่แถบ และแต่ละแถบมีขนาดประมาณเท่าใด



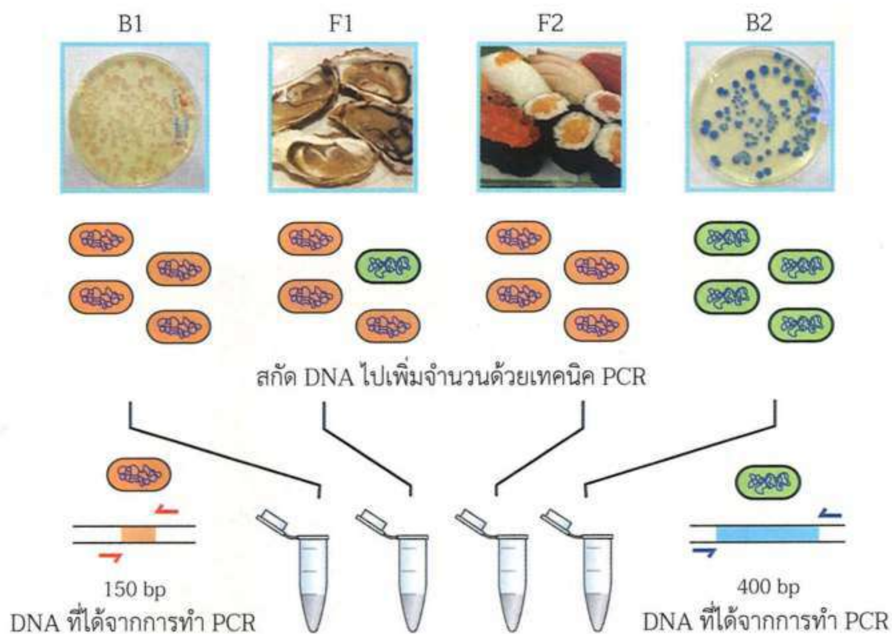
รูป 6.8 แถบโมเลกุล DNA ขนาดต่าง ๆ



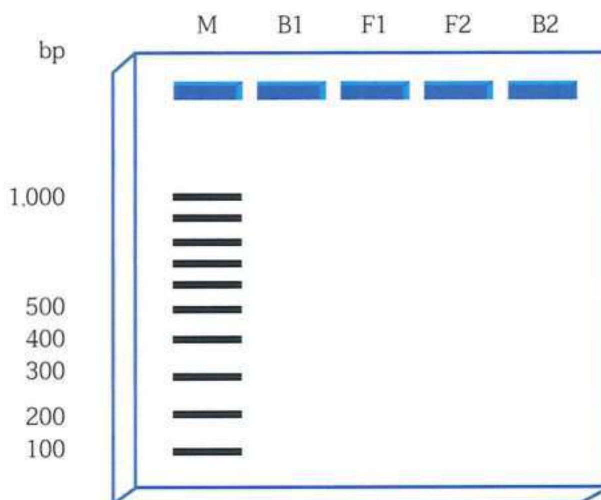
กรณีศึกษา

ในงานเลี้ยงหนึ่งมีผู้รับประทานอาหารแล้วเกิดอาการอาหารเป็นพิษ เมื่อนำเชื้อแบคทีเรียจากผู้ป่วยไปเพาะเชื้อ พบว่ามีเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ก่อโรค (B1) และแบคทีเรียที่ก่อโรค (B2) เมื่อสอบถามผู้ป่วยพบว่า ผู้ป่วยทุกคนรับประทานอาหารชนิดที่ 1 (F1) และอาหารชนิดที่ 2 (F2)

ในการตรวจหาแบคทีเรียสามารถทำโดยใช้เทคนิค PCR ถ้าสกัด DNA จากจานเพาะเชื้อ 1 ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ก่อโรค จานเพาะเชื้อ 2 ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ก่อโรค อาหารชนิดที่ 1 และอาหารชนิดที่ 2 แล้วนำไปทำปฏิกิริยา PCR โดยใส่ไพรเมอร์ 2 คู่ ลงในแต่ละหลอด เพื่อตรวจสอบสายพันธุ์ของแบคทีเรีย โดยไพรเมอร์จะทำให้เกิดการสังเคราะห์ DNA ขนาดแตกต่างกัน ดังรูป

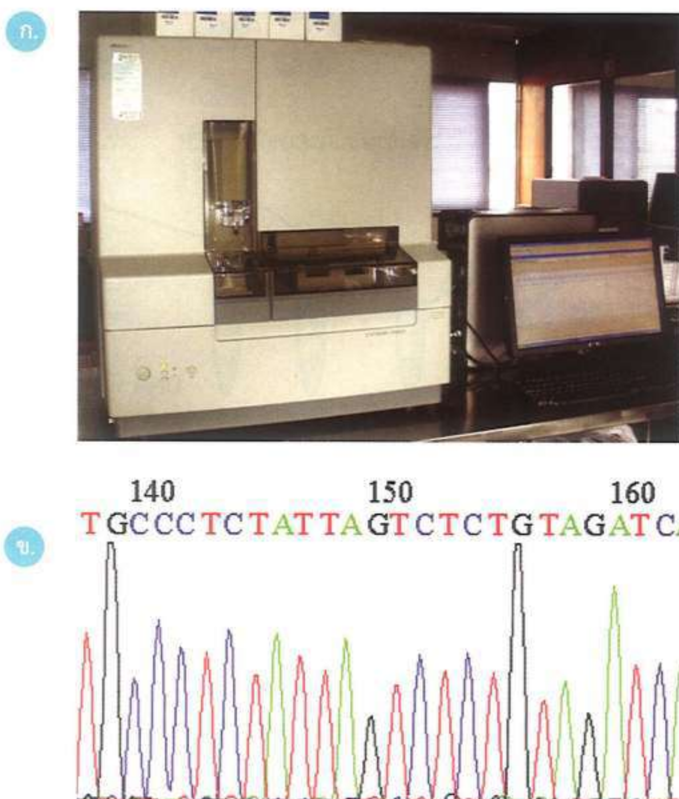


จากนั้นนำ DNA ที่ได้จากเทคนิค PCR ไปหาขนาดด้วยเทคนิคเจลอิเล็กโทรฟอรีซิส โดยเปรียบเทียบกับ DNA ที่ทราบขนาด (M) จงเขียนแถบ DNA จาก DNA ที่ได้จากแต่ละตัวอย่างลงในแต่ละแถวของแผ่นเจล



6.2.2 การหาลำดับนิวคลีโอไทด์

การหาลำดับการเรียงตัวของนิวคลีโอไทด์ในสาย DNA เรียกว่า **การหาลำดับดีเอ็นเอ** (DNA sequencing) สามารถทำได้โดยหาลำดับเบสที่เป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์บนสาย DNA ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า **เครื่องหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอัตโนมัติ** (automated sequencer) โดยมีการพัฒนาเทคนิคและซอฟต์แวร์ ทำให้สามารถอ่านผลในรูปของลำดับเบสได้อย่างรวดเร็ว ดังรูป 6.9

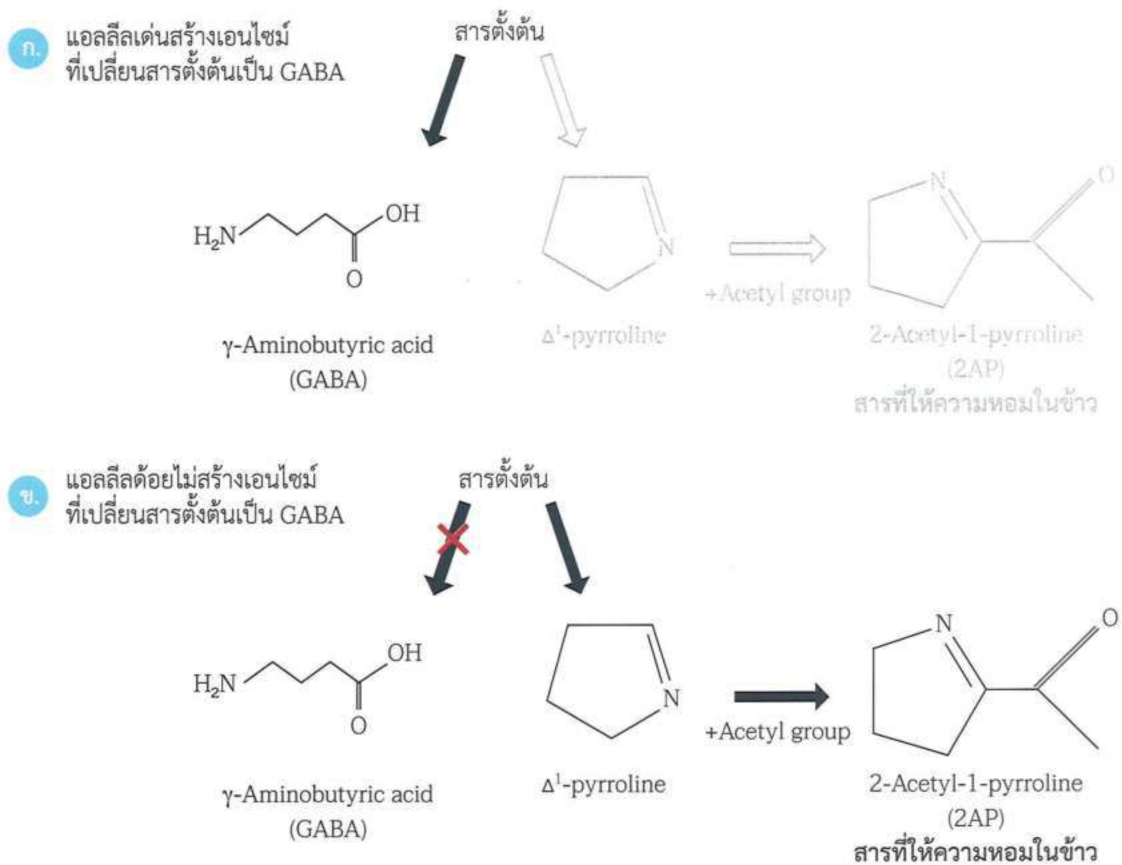


รูป 6.9 **การหาลำดับนิวคลีโอไทด์**
ก. เครื่องหาลำดับนิวคลีโอไทด์แบบอัตโนมัติ ข. ผลการอ่านลำดับเบส

เมื่อได้ลำดับเบสแล้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น นำไปเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อให้ทราบว่าลำดับเบสนั้นเป็นยีนใดหรือมีมิวเทชันในตำแหน่งใดบ้าง นอกจากนี้ยังสามารถนำลำดับเบสนั้นไปแปลงเป็นลำดับกรดอะมิโนเพื่อใช้ทำนายโครงสร้างและหน้าที่ของโปรตีนได้อีกด้วย

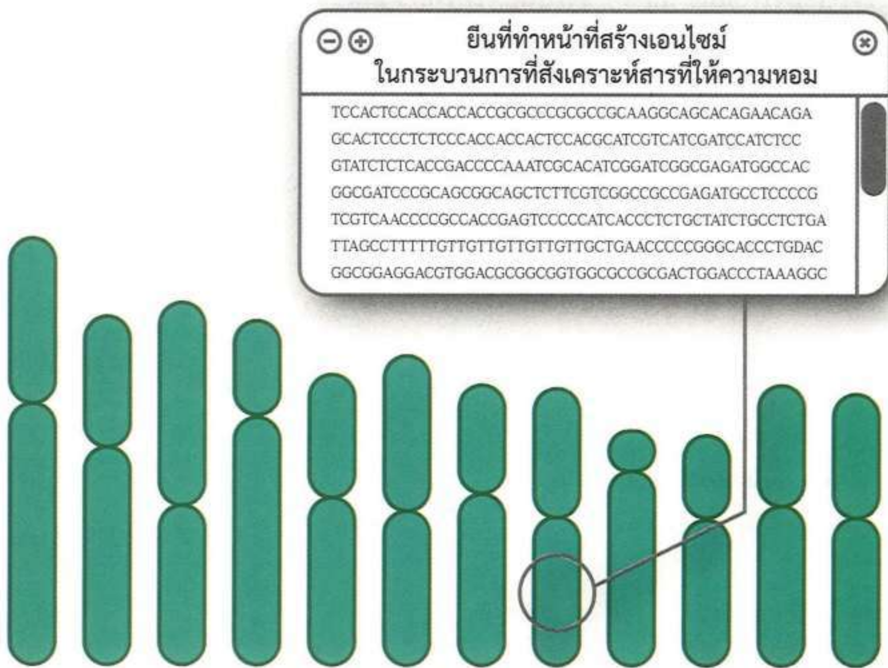
6.3 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

จากงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ศึกษาลักษณะความหอมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าแอลลีลที่ควบคุมลักษณะดังกล่าวเป็นแอลลีลด้อย และเมื่อศึกษาตำแหน่งของยีนร่วมกับการผสมพันธุ์ และการใช้ข้อมูลของจีโนมข้าว ทำให้สามารถระบุได้ว่ายีนดังกล่าวมีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซมแท่งที่ 8 ทำหน้าที่สร้างเอนไซม์ในกระบวนการสังเคราะห์ γ-Aminobutyric acid (GABA) โดยแอลลีลด้อยจะไม่สร้างเอนไซม์นี้ ทำให้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ GABA ถูกเปลี่ยนเป็นสาร 2 Acetyl-1-pyrroline (2AP) ซึ่งเป็นสารที่ให้ความหอม (รูป 6.10) จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถใช้ความรู้นี้ในการตรวจสอบสายพันธุ์ข้าวที่มีความหอม และการพัฒนาพันธุ์ข้าวโดยการยับยั้งการแสดงออกของยีนดังกล่าว



รูป 6.10 แผนภาพแสดงวิถีการสร้างสารที่ให้ความหอมในข้าว
ก. การสร้างสาร GABA ในข้าว ข. การสร้างสารที่ให้ความหอมในข้าวที่มีแอลลีลด้อย

ลักษณะของสิ่งมีชีวิตถูกควบคุมด้วยยีน โดยลักษณะหรือแอลลีลที่แตกต่างกันเกิดขึ้นจาก DNA ซึ่งมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่แตกต่างกัน การศึกษาจีโนมของสิ่งมีชีวิตทำให้ทราบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ทำหน้าที่เป็นยีน และการวิเคราะห์ข้อมูลนี้อาจทำให้ทราบหน้าที่และตำแหน่งของยีนต่าง ๆ เช่น การศึกษาจีโนมของข้าวทำให้ทราบข้อมูลลำดับเบสของยีนที่ทำหน้าที่ควบคุมการสังเคราะห์เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์สารที่ให้ความหอมซึ่งอยู่บนโครโมโซมแท่งที่ 8 (รูป 6.11) ที่ได้กล่าวถึงข้างต้น



รูป 6.11 ข้อมูลโครโมโซมแท่งที่ 8 ของข้าวจากฐานข้อมูลจีโนมข้าว

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีโปรตีนทำหน้าที่ต่าง ๆ ภายในเซลล์ หากการทำงานของยีนในการควบคุมการสร้างโปรตีนเปลี่ยนแปลงไป อาจมีผลต่อลักษณะของสิ่งมีชีวิตได้ ถ้าทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของฟีโนไทป์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนหรือยีนใด อาจทำให้ทราบถึงหน้าที่ของยีนนั้นได้ ดังนั้น การศึกษาหน้าที่ของยีนอาจทำได้โดยการชักนำให้เกิดมิวเทชันในสิ่งมีชีวิต แล้วอาศัยเทคนิคต่าง ๆ ทางชีววิทยาระดับโมเลกุล เพื่อศึกษาสิ่งมีชีวิตที่มีการเปลี่ยนแปลงของฟีโนไทป์ที่สนใจว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ยีนใด (รูป 6.12)



รูป 6.12 วิธีการที่ใช้ในการระบุยีนที่ควบคุมลักษณะที่ต้องการ โดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟีโนไทป์ของสิ่งมีชีวิต

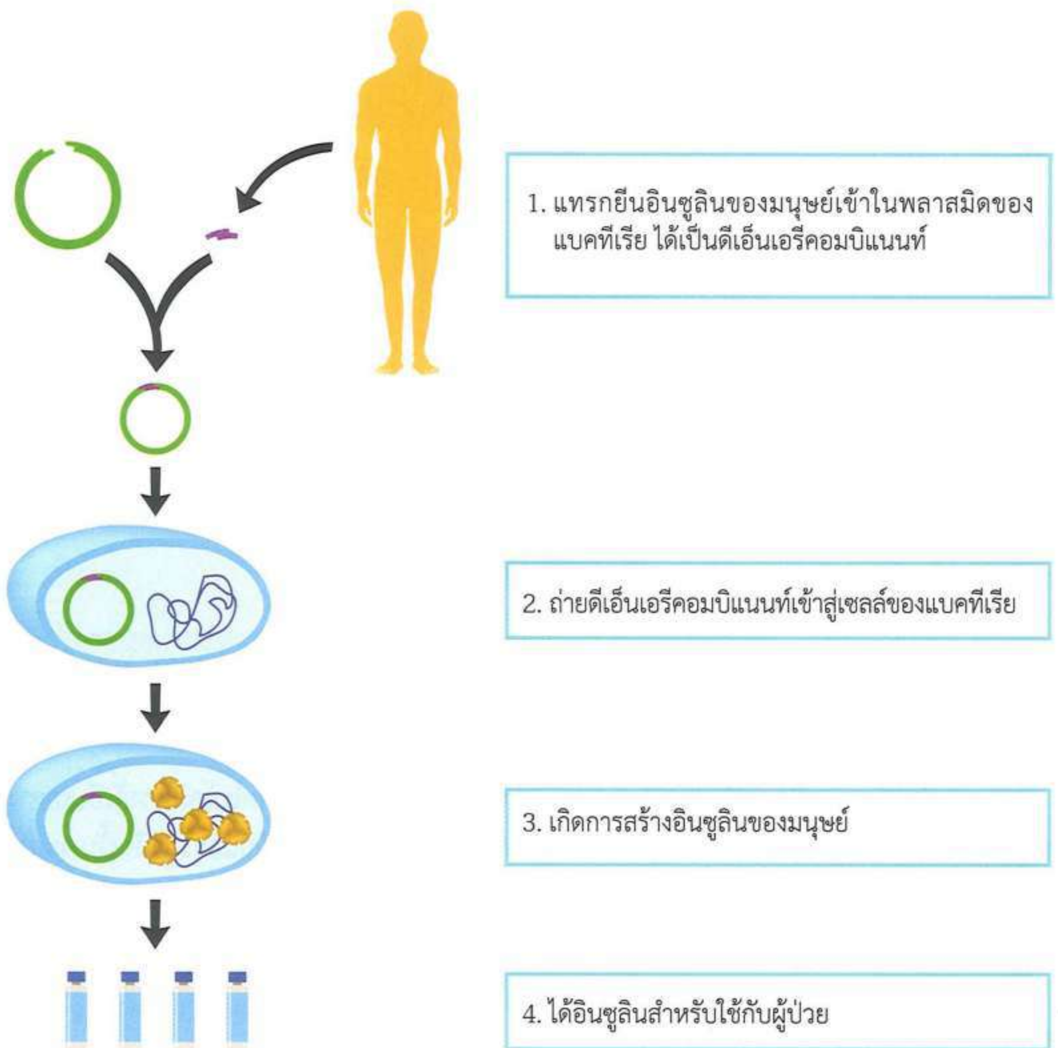
จะเห็นได้ว่าการศึกษาพันธุศาสตร์ประกอบกับความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอสามารถนำไปสู่การค้นพบยีนที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ และหากเข้าใจกลไกการทำงานของยีนและโปรตีนนั้น จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น การแพทย์และเภสัชกรรม การเกษตร อุตสาหกรรม และนิติวิทยาศาสตร์

6.3.1 ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม

การประยุกต์เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอใช้ในด้านการแพทย์และเภสัชกรรมนั้นมีมาเป็นเวลานานแล้ว โดยได้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ การวินิจฉัยโรค และการบำบัดด้วยยีน

การสร้างผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และเภสัชกรรม

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในเชิงเภสัชกรรมนั้นส่วนมากจะเป็นการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเพื่อผลิตโปรตีนที่นำมาใช้ประกอบการรักษา เช่น การผลิตฮอร์โมนอินซูลิน (รูป 6.13) เพื่อนำมาใช้ควบคุมอาการของโรคเบาหวาน ซึ่งเป็นตัวอย่างแรกที่นำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์



รูป 6.13 การสร้างแบคทีเรียดัดแปรพันธุกรรมที่มียีนที่ควบคุมการผลิตอินซูลินของมนุษย์

การผลิตอินซูลินโดยอาศัยแบคทีเรียดัดแปรพันธุกรรมนี้จะได้อินซูลินในปริมาณมาก สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีแบบเดิมซึ่งอาศัยการสกัดจากตับอ่อนของวัวหรือหมูอีกด้วย นอกจากอินซูลินแล้วยังมีการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาใช้ในการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเพื่อผลิตโปรตีนอื่น ๆ เช่น ใช้ผลิตโกรทฮอร์โมน (growth hormone) ซึ่งนำมาใช้ในการรักษาเด็กที่มีสภาพแคระเนื่องจากการขาดโกรทฮอร์โมน ใช้ผลิตวัคซีนเพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันแทนการใช้ไวรัสซึ่งทำให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น เช่น วัคซีนป้องกันไวรัสตับอักเสบชนิด B



ความรู้เพิ่มเติม

ลำดับนิวคลีโอไทด์ที่จำเพาะของแต่ละบุคคล สามารถใช้ในการตรวจสอบการตอบสนองต่อยา (drug response) หรือ ภาวะแทรกซ้อนจากการรับยา ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละบุคคล เช่น

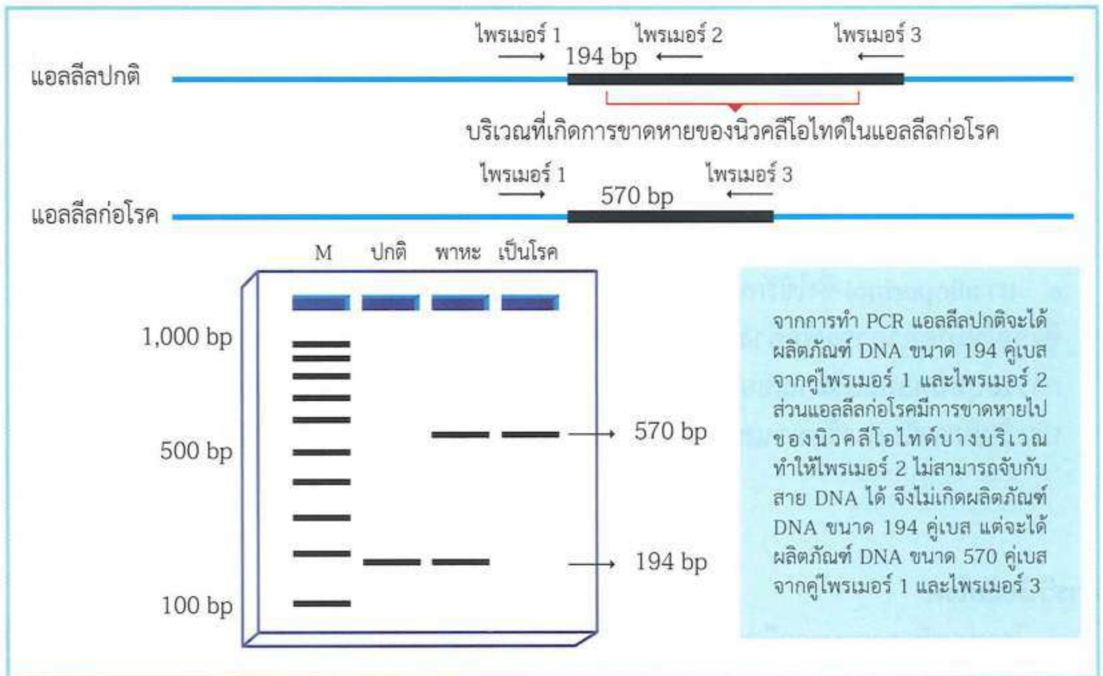
- ยา carbamazepine ซึ่งใช้รักษาผู้ป่วยซึ่งมีอาการลมชัก
- ยา allopurinol ซึ่งใช้รักษาโรคเกาต์

ซึ่งก่อให้เกิดอาการแพ้อย่างรุนแรงในบางคน แพทย์จึงสามารถวางแนวทางในการรักษา การระบุชนิดและปริมาณของยาได้อย่างเหมาะสมและจำเพาะกับผู้ป่วยแต่ละคน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา และลดความเสี่ยงของการแพ้ยาและการรับยาเกินขนาด

การวินิจฉัยโรค

โรคทางพันธุกรรมอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดมิวเทชันของยีนจนทำให้เกิดแอลลีลก่อโรค ซึ่งมีลำดับนิวคลีโอไทด์แตกต่างไปจากแอลลีลปกติ เมื่อทราบลำดับนิวคลีโอไทด์ของแอลลีลดังกล่าว สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการวินิจฉัยโรคทางพันธุกรรม ตรวจสอบความเสี่ยงในการเกิดโรคเพื่อป้องกัน หรือวางแผนในการรักษา เช่น การตรวจสอบแอลลีลก่อโรคในเอ็มบริโอและทารกแรกเกิด

การตรวจหาแอลลีลก่อโรคสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ คือ การทำ PCR เพื่อเพิ่มปริมาณ DNA ในบริเวณของยีนที่เกี่ยวข้องกับการก่อโรค โดยใช้ไพรเมอร์ที่มีความจำเพาะกับลำดับนิวคลีโอไทด์ที่มีความแตกต่างกันระหว่างแอลลีลไม่ก่อโรคกับแอลลีลก่อโรค ซึ่งในตัวอย่างจะทำให้ไพรเมอร์ไม่สามารถจับกับ DNA ของแอลลีลก่อโรคได้และไม่เกิดผลิตภัณฑ์ของการทำ PCR จึงสามารถแยกความแตกต่างและตรวจหาแอลลีลก่อโรคได้ เช่น การตรวจคัดโรคทาลัสซีเมียบางชนิด (รูป 6.14)



รูป 6.14 การทำ PCR เพื่อตรวจคัดโรคทาลัสซีเมียบางชนิด

นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาใช้ในการวินิจฉัยโรคที่เกิดจากการติดเชื้อต่าง ๆ เช่น การติดเชื้อ HIV โดยการใช้เทคนิค PCR เพื่อตรวจสอบหาจีโนมของ HIV ซึ่งจะสามารถตรวจพบได้แม้มีปริมาณตัวอย่างน้อย และตรวจพบได้รวดเร็วหลังการติดเชื้อ ซึ่งทำให้การรักษาเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

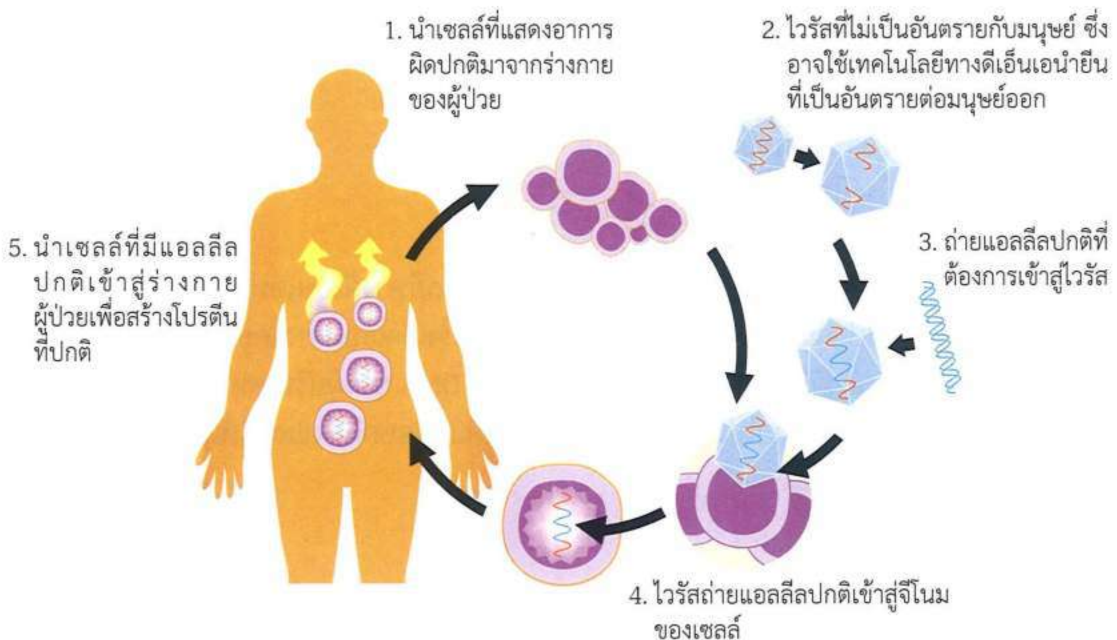


ความรู้เพิ่มเติม

ในบางครั้งการตรวจพบแอลลีลที่เกี่ยวกับการเกิดโรค อาจไม่ได้หมายความว่าผู้ถูกตรวจพบจะเป็นโรคดังกล่าว เช่น การตรวจหาแอลลีลที่เกิดจากการกลายของยีน *BRCA* ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคมะเร็งเต้านมและมะเร็งรังไข่ ผู้มีแอลลีลดังกล่าวเพียงมีโอกาสหรือมีความเสี่ยงในการเป็นโรคมะเร็งเท่านั้น โดยแพทย์จะแนะนำให้ผู้ที่ตรวจพบแอลลีลดังกล่าวเข้ารับการตรวจหามะเร็งเต้านมในช่วงอายุที่น้อยกว่าและถี่กว่าผู้ที่ไม่มีแอลลีลนี้ รวมทั้งเข้ารับการตรวจที่มีความละเอียดมากขึ้น

การบำบัดด้วยยีน

จากความรู้เกี่ยวกับโรคทางพันธุกรรมรวมถึงอาการผิดปกติต่าง ๆ ที่เกิดจากยีน จึงมีแนวคิดในการบำบัดด้วยยีนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรคหรืออาการดังกล่าวโดยตรง โดยการถ่ายแอลลีลที่ปกติเข้าไปในเซลล์หรือเนื้อเยื่อที่แสดงอาการผิดปกติ เพื่อให้ยีนนั้นแทรกตัวเข้าสู่จีโนมของมนุษย์ และควบคุมให้ยีนนั้นมีการแสดงออกและสร้างโปรตีนที่ปกติ ซึ่งจะสามารถบรรเทาหรือรักษาอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ เรียกวิธีการนี้ว่า **การบำบัดด้วยยีน** (gene therapy) ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ไวรัสบางชนิดเป็นตัวนำยีนที่ต้องการถ่ายเข้าสู่เซลล์มนุษย์ ซึ่งยีนที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์จะถูกกำจัดออกก่อนและแทนที่ด้วยยีนที่ต้องการ (รูป 6.15)



รูป 6.15 การบำบัดด้วยยีนเพื่อรักษาโรค

เทคนิคการบำบัดด้วยยีนมีการพัฒนาและนำไปใช้ในการรักษาจริง เช่น บางประเทศในทวีปยุโรปอนุญาตให้นำเทคโนโลยีนี้มาใช้รักษาโรคภูมิคุ้มกันบกพร่องรุนแรงชนิด ADA (adenosine deaminase severe immunodeficiency) ซึ่งเป็นโรคทางพันธุกรรมชนิดหนึ่งที่ควบคุมโดยแอลลีลด้อย เกิดจากการกลายในยีน *ADA* ที่สร้างเอนไซม์ adenosine deaminase ทำให้ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง ไม่สามารถต่อสู้กับเชื้อโรคที่พบได้ทั่วไป ในการบำบัดด้วยยีนจะใช้เซลล์ไขกระดูกจากผู้ป่วยมาผ่านกระบวนการทำให้เซลล์มีแอลลีลที่ปกติของยีน *ADA* และนำกลับเข้าไปในร่างกายทำให้ผู้ป่วยมีเซลล์ที่สร้างเอนไซม์ adenosine deaminase ได้ตามปกติ

อย่างไรก็ตามการบำบัดด้วยยีนยังอยู่ในขั้นตอนการศึกษาซึ่งต้องใช้ด้วยความระมัดระวังและมีการตรวจสอบอย่างเคร่งครัดในทุกขั้นตอน เนื่องจากยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับการใช้เทคนิคและความปลอดภัยในหลาย ๆ ด้าน เช่น การแทรกยีนเข้าไปในจีโนมอาจรบกวนการทำงานของยีนอื่นหรืออาจทำให้เกิดมะเร็งได้ ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคนิคที่จำเพาะขึ้น เช่น การรักษาโรคด้วย**การตรวจแก้จีโนม** (genome editing) โดยแก้ไขมิวเทชันในยีนเป้าหมายเฉพาะตำแหน่งที่ผิดปกติในจีโนม ซึ่งแตกต่างจากการบำบัดด้วยยีนที่เป็นการใส่ยีนปกติทั้งยีนเข้าไปในจีโนม



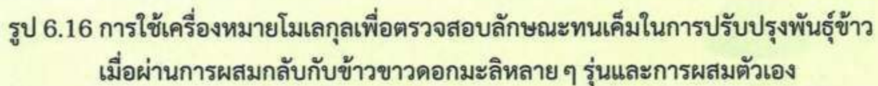
ชวนคิด

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ครีมบำรุงผิวหน้าที่มีการโฆษณาว่ามีส่วนประกอบของชิ้นส่วน DNA ซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถซึมเข้าสู่เซลล์ และทำให้เซลล์สามารถซ่อมแซม DNA ได้อย่างรวดเร็ว นักเรียนคิดว่าข้อความในโฆษณาดังกล่าวมีความเป็นไปได้เพียงใด

นอกจากการรักษาโดยตรงแล้ว ยังมีการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาใช้ในการติดตามผลการรักษาโรค เช่น การปลูกถ่ายไขกระดูกในการรักษาโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว โดยจะเปรียบเทียบ DNA ในเซลล์เม็ดเลือดขาวของผู้ที่รับการปลูกถ่ายไขกระดูกว่ามี DNA ของผู้บริจาคหรือไม่ เพื่อตรวจสอบว่ามีเซลล์ไขกระดูกของผู้บริจาคไปแทนที่เซลล์ไขกระดูกเดิมที่ผิดปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปลูกถ่ายไขกระดูกประสบความสำเร็จ

6.3.2 ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม

ด้านการเกษตรได้มีการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาประยุกต์ใช้ในด้านการปรับปรุงพันธุ์พืชและสัตว์ โดยใช้ในการคัดเลือกพืชและสัตว์ด้วยการตรวจหา**เครื่องหมายโมเลกุล** (molecular marker) ของลักษณะที่ต้องการเพื่อช่วยลดระยะเวลาการปรับปรุงพันธุ์แบบดั้งเดิมซึ่งเป็นการคัดเลือกจากลักษณะฟีโนไทป์เพียงอย่างเดียว เช่น ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าว ได้มีการศึกษาลักษณะทนเค็มของข้าว โดยตรวจสอบได้จากเครื่องหมายโมเลกุลที่ถ่ายทอดร่วมกับยีนทนเค็ม เมื่อทำการผสมพันธุ์ระหว่างข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิที่ปลูกเพื่อการค้าซึ่งมีลักษณะความหอม ต้นเตี้ย กับข้าวพันธุ์ที่มีลักษณะทนเค็มเพื่อให้ได้ข้าวที่มีลักษณะที่ดีของข้าวขาวดอกมะลิและมีลักษณะทนเค็มร่วมด้วย จึงสามารถใช้เครื่องหมายโมเลกุลเหล่านี้เป็นตัวคัดเลือกต้นข้าวที่ได้รับยีนดังกล่าวได้ (รูป 6.16)



รูป 6.16 การใช้เครื่องหมายโมเลกุลเพื่อตรวจสอบลักษณะทนเค็มในการปรับปรุงพันธุ์ข้าว เมื่อผ่านการผสมกลับกับข้าวขาวดอกมะลิหลาย ๆ รุ่นและการผสมตัวเอง



ความรู้เพิ่มเติม

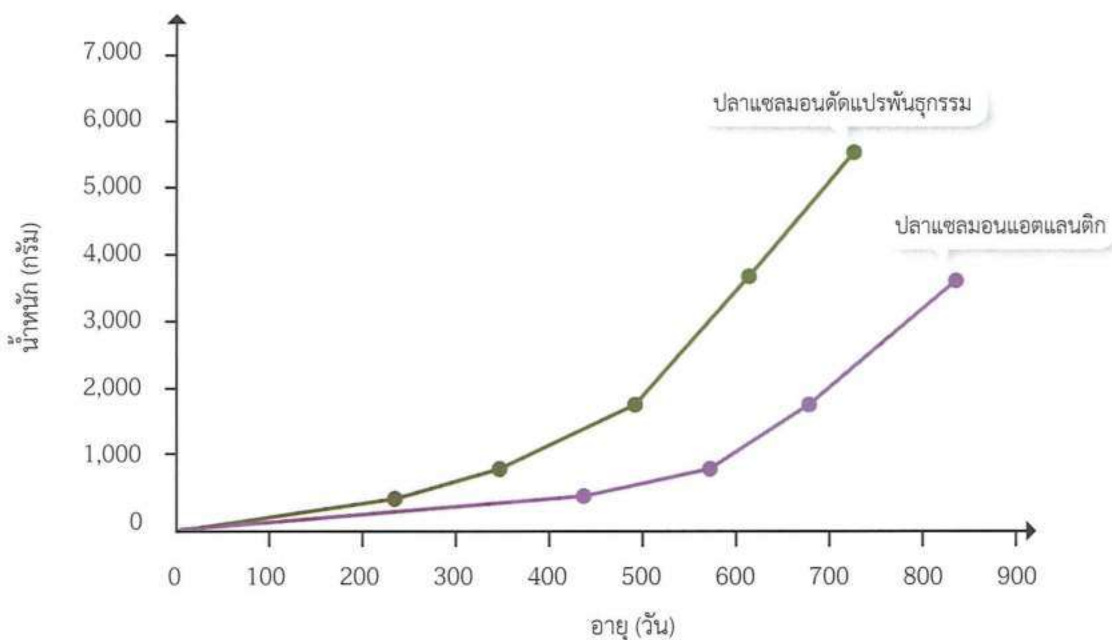
เครื่องหมายโมเลกุล คือ ลำดับนิวคลีโอไทด์ภายในจีโนมที่สามารถใช้ระบุตัวตนหรือชนิดของสิ่งมีชีวิต รวมถึงลักษณะที่สนใจ โดยอาศัยความแตกต่างในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความต่างของลำดับนิวคลีโอไทด์ซึ่งเกิดจากการแทนที่คู่เบส การเพิ่มขึ้นหรือขาดหายไปของนิวคลีโอไทด์ รวมทั้งจำนวนซ้ำของลำดับนิวคลีโอไทด์สั้น ๆ ที่เรียงต่อกัน

การสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเป็นอีกวิธีหนึ่งในการปรับปรุงพันธุ์สิ่งมีชีวิตให้มีลักษณะที่มนุษย์ต้องการเพื่อการเกษตร ซึ่งอาจเป็นไปเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิต เพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต เพื่อยืดอายุผลผลิต เป็นต้น การสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ microinjection ในเซลล์สัตว์ การใช้แบคทีเรีย *Agrobacterium tumefaciens* เพื่อนำยีนที่ต้องการเข้าสู่จีโนมพืช (รูป 6.17)



รูป 6.17 แผนภาพตัวอย่างการทำ GMO ในพืชโดยใช้ *A. tumefaciens* โดยถ่ายยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารสีสีน้ำเงินจากต้นไอริสเข้าสู่จีโนมกุหลาบเพื่อสร้างต้นกุหลาบที่ให้ดอกสีน้ำเงิน

สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมหลายชนิดได้รับการอนุญาตให้เลี้ยงและเพาะปลูกเพื่อการค้าขายในหลายประเทศ เช่น ถั่วเหลืองต้านทานยาปราบศัตรูพืช ข้าวโพด BT ซึ่งผลิตโปรตีนที่เป็นพิษต่อตัวอ่อนของแมลงศัตรูพืช มะละกอต้านทานโรคพืชใบด่างจุดวงแหวน มะเขือเทศชะลอการสุกและเน่าเสีย ปลาม้าลายเรืองแสง รวมทั้งปลาแซลมอนที่เติบโตเร็วกว่าปลาแซลมอนแอตแลนติกปกติ (รูป 6.18) ซึ่งเป็นสัตว์ชนิดแรกที่ได้รับการรับรองจาก FDA (Food and Drug Administration) สหรัฐอเมริกา ทำให้สามารถวางจำหน่ายเพื่อใช้ประกอบอาหารได้อย่างถูกกฎหมาย



รูป 6.18 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของปลาแซลมอนดัดแปรพันธุกรรมกับปลาแซลมอนแอตแลนติก

นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมอีกด้วย เช่น มีการนำเอนไซม์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมมาทำให้โปรตีนในน้ำนมตกตะกอนเพื่อผลิตชีส ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอกเพื่อขจัดคราบไขมัน เป็นต้น และยังมีแนวคิดในการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น ในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น แนวคิดในการสร้างแบคทีเรียที่ผลิตสารที่ช่วยย่อยน้ำมัน แต่แนวคิดดังกล่าวยังอยู่ในระหว่างการศึกษา

6.3.3 ด้านนิติวิทยาศาสตร์

ปัจจุบันมีการนำองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาใช้ประโยชน์ในเชิงกฎหมาย เรียกว่า นิติวิทยาศาสตร์ (forensic science) โดยใช้เป็นหลักฐานในการสนับสนุนข้อกล่าวอ้างหรือพิสูจน์ข้อเท็จจริงเพื่อประกอบการพิจารณาคดี ซึ่งองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ที่นำมาใช้นั้นมีหลากหลายด้าน รวมถึงความรู้เกี่ยวกับพันธุศาสตร์และเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

เนื่องจากสิ่งมีชีวิตมีความแตกต่างทางพันธุกรรมในระดับบุคคล จะไม่มีใครที่มีลำดับเบสเหมือนกันทุกประการ จึงสามารถใช้ความแตกต่างระดับพันธุกรรมนี้เป็นข้อมูลในการระบุบุคคลได้ (ยกเว้นแฝดร่วมไข่) โดยเทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้ คือ **การวิเคราะห์ STR** (short tandem repeat analysis)

ชวนคิด

น้ำลาย อสุจิ เส้นผม เส้นขน และเล็บ สามารถนำมาเป็นวัตถุพยานทางชีววิทยาเพื่อใช้ในการระบุบุคคลได้หรือไม่

สาย DNA จะมีบริเวณที่มีลำดับเบสประมาณ 2-6 เบส ซ้ำ ๆ กันต่อเนื่องเป็นช่วงยาว เรียก short tandem repeat (STR) ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปในจีโนมของสิ่งมีชีวิต โครโมโซมที่เป็นฮอมอโลกัสกันจะมี STR อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่ STR นั้นอาจมีความยาวต่างกันในแต่ละแอลลีล ขึ้นอยู่กับจำนวนซ้ำใน STR (รูป 6.19) และจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละบุคคล ซึ่งในการนับจำนวนซ้ำจะนับเป็นคู่เบส และการเขียนลำดับนิวคลีโอไทด์มักจะเขียนของสายบนจากทิศ 5′ ไป 3′ เพียงสายเดียว

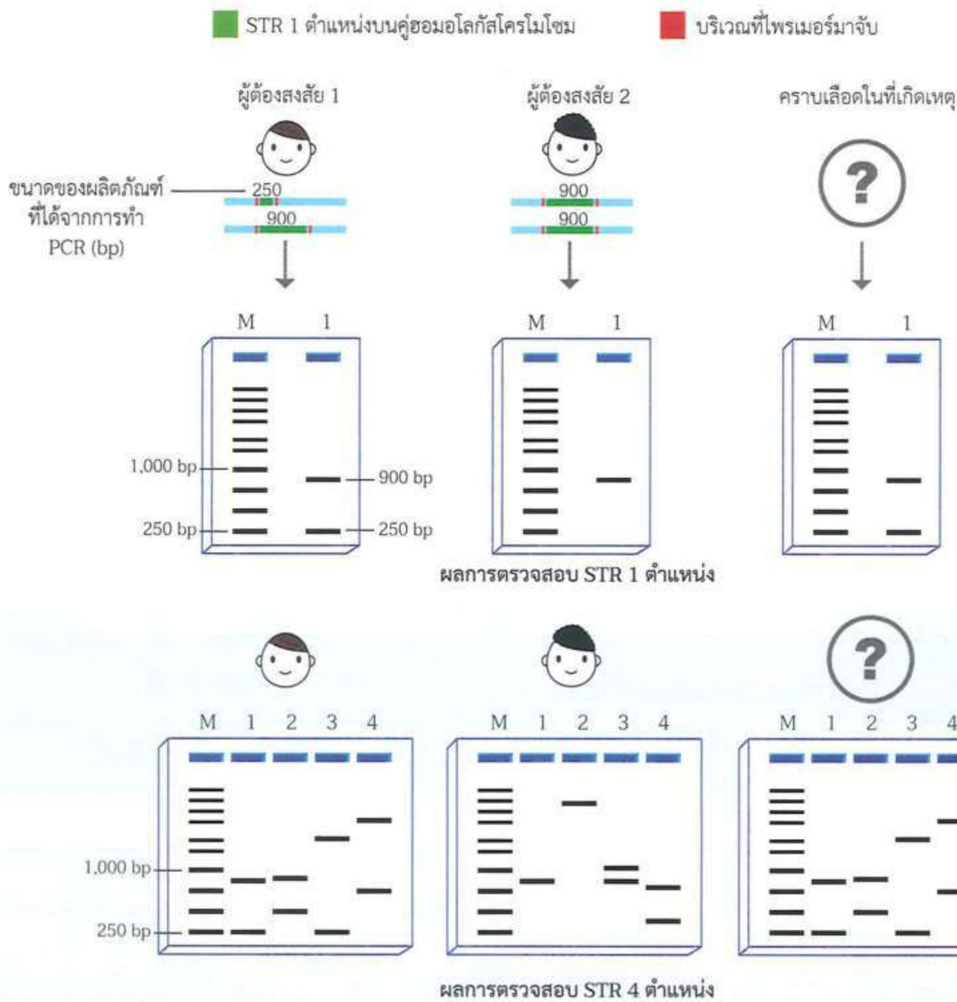
รูป 6.19 STR ที่ตำแหน่งเดียวกันของคู่ฮอมอโลกัสโครโมโซมซึ่งมีจำนวนซ้ำแตกต่างกันในบุคคลหนึ่ง

? ระบุลำดับเบสในแต่ละซ้ำของ STR และจำนวนซ้ำของ STR ในบุคคลหนึ่งจากข้อมูลต่อไปนี้ลงในตารางด้านล่าง

โครโมโซมคู่ที่ 1	แอลลีล ที่ 1	5′ ATGCGCGCAC GGAGGAGGAGGAGGA CGACACGCC 3′ 3′ TACGCGCGTG CCTCCTCCTCCTCCT GCTGTGCGG 5′
	แอลลีล ที่ 2	5′ ATGCGCGCAC GGAGGAGGAGGAGGAGGAGGAGGAGGA CGACACGCC 3′ 3′ TACGCGCGTG CCTCCTCCTCCTCCTCCTCCTCCTCCT GCTGTGCGG 5′
โครโมโซมคู่ที่ 2	แอลลีล ที่ 1	5′ GTCAGCCTAGC ACGCTACGCTACGCTACGCTACGCTACGCT GCTGCAGCT 3′ 3′ CAGTCGGATCG TGCGATGCGATGCGATGCGATGCGATGCGA CGACGTCGA 5′
	แอลลีล ที่ 2	5′ GTCAGCCTAGC ACGCTACGCTACGCTACGCTACGCTACGCT GCTGCAGCT 3′ 3′ CAGTCGGATCG TGCGATGCGATGCGATGCGATGCGATGCGA CGACGTCGA 5′

โครโมโซม	ลำดับเบสในแต่ละซ้ำของ STR	จำนวนซ้ำของ STR	
		แอลลีลที่ 1	แอลลีลที่ 2
คู่ที่ 1			
คู่ที่ 2			

การวิเคราะห์ STR คือการตรวจหาจำนวนซ้ำของ STR ในแต่ละตำแหน่งโดยการใช้เทคนิค PCR โดยการวิเคราะห์ STR แต่ละตำแหน่งจะใช้ไพรเมอร์ 1 คู่ ซึ่งมีลำดับเบสที่เป็นเบสคู่สมกับสายดีเอ็นเอแม่แบบในบริเวณที่ขนาบข้างกับ STR ที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นพิจารณาขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำ PCR ซึ่งในแต่ละแอลลีลจะมีขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันตามจำนวนซ้ำใน STR นั้น แต่เมื่อวิเคราะห์ STR 1 ตำแหน่ง ผลที่ได้อาจไม่สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างบุคคลได้ เมื่อใช้ไพรเมอร์ที่แตกต่างกันหลาย ๆ คู่เพื่อตรวจสอบ STR ในหลาย ๆ ตำแหน่งจะเกิดเป็นรูปแบบเฉพาะบุคคล เรียกว่า **ลายพิมพ์ดีเอ็นเอ** (DNA fingerprint) ซึ่งจำนวนตำแหน่งที่มากขึ้นจะช่วยให้สามารถแยกแยะความแตกต่างของแต่ละบุคคลได้อย่างจำเพาะมากขึ้นด้วย ดังรูป 6.20 สำหรับประเทศไทยมีการสร้างลายพิมพ์ดีเอ็นเอเพื่อระบุตัวบุคคลโดยเลือกเปรียบเทียบจากตำแหน่งของ STR ประมาณ 10-16 ตำแหน่ง ซึ่ง STR จัดเป็นเครื่องหมายโมเลกุลชนิดหนึ่ง



รูป 6.20 ลายพิมพ์ดีเอ็นเอเปรียบเทียบระหว่างผู้ต้องสงสัยและคราบเลือดที่พบในที่เกิดเหตุ จากการวิเคราะห์ STR 1 ตำแหน่ง และ STR 4 ตำแหน่ง

? คราบเลือดที่พบในที่เกิดเหตุควรจะเป็นเลือดจากผู้ต้องสงสัยคนใด เพราะเหตุใด

การที่บุคคลแต่ละบุคคลมีรูปแบบของลายพิมพ์ดีเอ็นเอที่แตกต่างกันออกไป จึงสามารถใช้การวิเคราะห์ STR เพื่อระบุตัวบุคคลได้ถูกต้อง นอกจากนี้ลายพิมพ์ดีเอ็นเอยังสามารถนำมาใช้ในการตรวจพิสูจน์ความสัมพันธ์ทางสายเลือด โดยลูกจะมีรูปแบบของลายพิมพ์ดีเอ็นเอครึ่งหนึ่งเหมือนพ่อและอีกครึ่งหนึ่งเหมือนแม่ เนื่องจากลูกจะได้รับ DNA มาจากพ่อและแม่อย่างละครึ่งผ่านการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

ในประเทศไทยมีการนำลายพิมพ์ดีเอ็นเอมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน เช่น

- ระบุตัวบุคคล เช่น ผู้เสียชีวิตจากเครื่องบินตก ผู้กระทำความผิดในคดีอาชญากรรม
- ระบุตัวตนของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เช่น ช้าง เสือ เพื่อป้องกันการนำสัตว์ป่ามาสวมสิทธิ์เป็นสัตว์ที่ลงทะเบียนถูกต้องตามกฎหมาย
- ตรวจพิสูจน์ความสัมพันธ์ทางสายเลือด ทั้งการหาความสัมพันธ์พ่อแม่ลูก รวมถึงความสัมพันธ์ในหมู่เครือญาติ
- จำแนกสิ่งมีชีวิตในระดับกลุ่มประชากร ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในแง่ของการระบุเชื้อชาติ ระบุถิ่นที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับการลักลอบนำเข้าสัตว์ผิดกฎหมาย
- จำแนกสิ่งมีชีวิตในระดับสปีชีส์ ซึ่งสามารถใช้ระบุว่าเป็นชิ้นเนื้อเยื่อหรือชิ้นส่วนของมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่น หรือตรวจสอบการปนเปื้อนของอาหาร เช่น เนื้อหมูในอาหารฮาลาล เนื้อปลาปักเป้าในลูกชิ้นปลา



กิจกรรมเสนอแนะ : การตรวจพิสูจน์ความสัมพันธ์ทางสายเลือดด้วยการวิเคราะห์ STR

จุดประสงค์

1. อธิบายหลักการวิเคราะห์ STR
2. วิเคราะห์ลายพิมพ์ดีเอ็นเอในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ทางสายเลือด

วิธีการทำกิจกรรม

ตอนที่ 1 จากข้อมูลลำดับเบสของโครโมโซม 3 คู่ ของเด็กคนหนึ่ง (โครโมโซมคู่ที่ 2 คู่ที่ 5 และคู่ที่ 15) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ STR ดังรูป 1 และข้อมูลลำดับเบสของคู่ไพรเมอร์ 3 คู่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ STR ดังตาราง 1 ให้นักเรียนทำกิจกรรม ดังนี้

1. ในการทำ PCR เพื่อวิเคราะห์ STR จะใช้ไพรเมอร์มาจับกับสายดีเอ็นเอแม่แบบเพื่อเพิ่มจำนวนชิ้นส่วน DNA ในบริเวณที่ต้องการ โดยไพรเมอร์จะจับกับสายดีเอ็นเอแม่แบบในบริเวณจำเพาะซึ่งมีลำดับเบสคู่สมกับลำดับเบสของไพรเมอร์ ให้นักเรียนวงรอบบริเวณลำดับเบสบน DNA สายเดี่ยวแต่ละสายบนแท่งโครโมโซมในตำแหน่งที่ไพรเมอร์สามารถมาจับเพื่อทำ PCR
2. หาลำดับเบสในแต่ละซ้ำของ STR จำนวนซ้ำของ STR และขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำ PCR โดยใช้ไพรเมอร์แต่ละคู่ และบันทึกผลในใบบันทึกผล
3. สร้างลายพิมพ์ดีเอ็นเอจากข้อมูลที่ได้ในใบบันทึกผล และตอบคำถามท้ายกิจกรรม

STR บน โครโมโซม คู่ที่ 2

264 bp

5'...CAGGCACTTAGG .... AATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATGAATG .... ACCTGTGTGGTT...3'
3'...GTCCGTGAATCC .... TTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTACTTAC .... TGGACACACCAA...5'

5'...CAGGCACTTAGG .... AATGAATGAATGAATGAATG .... ACCTGTGTGGTT...3'
3'...GTCCGTGAATCC .... TTACTTACTTACTTACTTAC .... TGGACACACCAA...5'

224 bp

STR บน โครโมโซม คู่ที่ 5

315 bp

5'...CCAAGGACTAGC .... AGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGATAGAT .... GAAGATGGCCAG...3'
3'...GGTTCCTGATCG .... TCTATCTATCTATCTATCTATCTATCTATCTATCTA .... CTTCTACCGGTC...5'

5'...CCAAGGACTAGC .... AGATAGATAGATAGATAGAT .... GAAGATGGCCAG...3'
3'...GGTTCCTGATCG .... TCTATCTATCTATCTATCTA .... CTTCTACCGGTC...5'

299 bp

STR บน โครโมโซม คู่ที่ 15

211 bp

5'...CCTATGGATTGG .... AAATAAATAAATAAATAAATAAAT .... ATGTAGTCTCAT...3'
3'...GGATACCTAACC .... TTTATTTATTTATTTATTTATTTA .... TACATCAGAGTA...5'

5'...CCTATGGATTGG .... AAATAAATAAATAAATAAATAAAT .... ATGTAGTCTCAT...3'
3'...GGATACCTAACC .... TTTATTTATTTATTTATTTATTTA .... TACATCAGAGTA...5'

211 bp

ตาราง 1 ข้อมูลลำดับเบสของคู่ไพรเมอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ STR

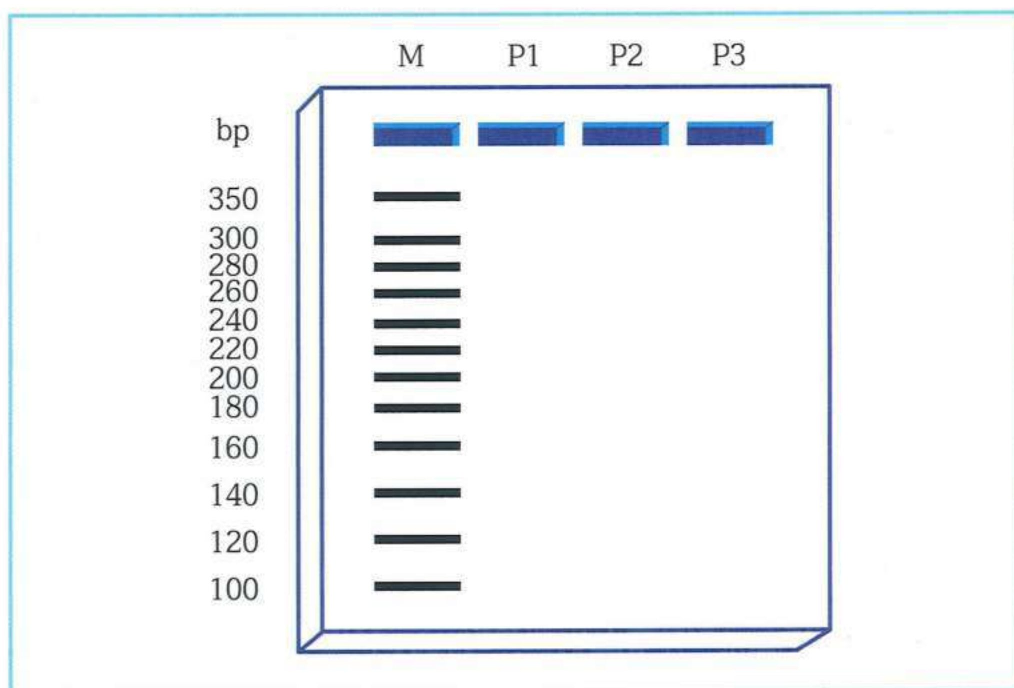
ไพรเมอร์ คู่ที่ 1 (P1)	5' GGCACTTAGG 3'
	3' TGGACACACC 5'
ไพรเมอร์ คู่ที่ 2 (P2)	5'AAGGACTAGC 3'
	3' CTTCTACCGG 5'
ไพรเมอร์ คู่ที่ 3 (P3)	5' TATGGATTGG 3'
	3' TACATCAGAG 5'

รูป 1 ข้อมูลลำดับเบสบนโครโมโซม 3 คู่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ STR ของเด็กคนหนึ่ง

ใบบันทึกผล

ตารางบันทึกลำดับเบสในแต่ละซ้ำของ STR จำนวนซ้ำของ STR และขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำ PCR โดยใช้ไพรเมอร์แต่ละคู่

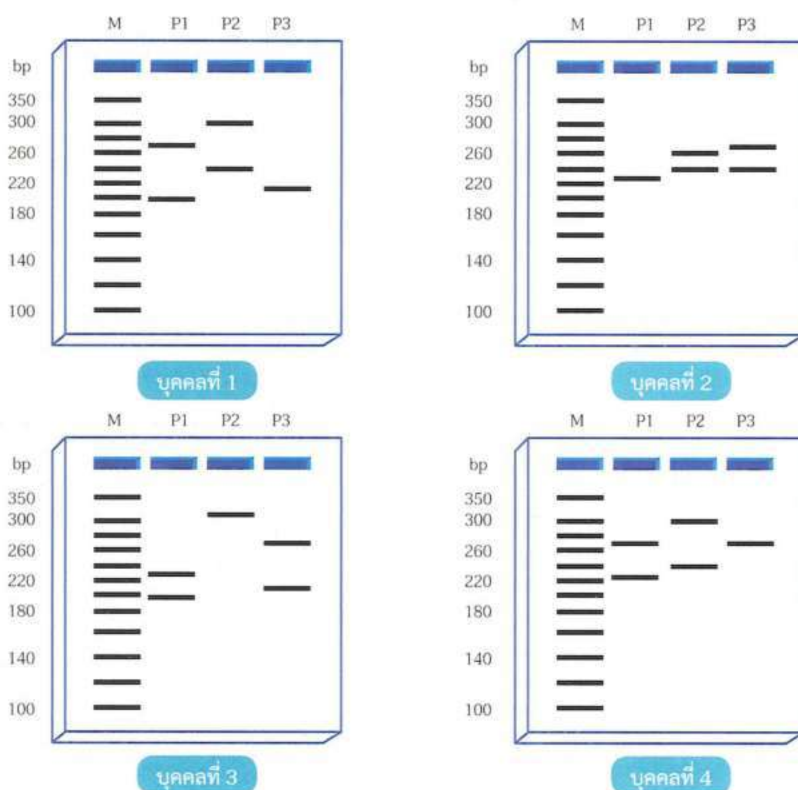
คู่ไพรเมอร์	ลำดับเบสในแต่ละซ้ำของ STR	จำนวนซ้ำของ STR		ขนาดของผลิตภัณฑ์ (bp)	
		แอลลีลที่ 1	แอลลีลที่ 2	แอลลีลที่ 1	แอลลีลที่ 2
P1					
P2					
P3					



ลายพิมพ์ดีเอ็นเอจากการวิเคราะห์ STR

ตอนที่ 2 ถ้ามีบุคคล 4 คนกล่าวอ้างว่าเป็นพ่อและแม่ของเด็กในกิจกรรมตอนที่ 1 เมื่อทำการวิเคราะห์ STR ของบุคคลทั้ง 4 โดยใช้ไพรเมอร์เดียวกับตอนที่ 1 ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูป 2

ให้นักเรียนเปรียบเทียบลายพิมพ์ดีเอ็นเอของบุคคลที่กล่าวอ้างเป็นพ่อแม่ของเด็กในรูป 2 กับลายพิมพ์ DNA ของเด็กที่ได้จากตอนที่ 1 เพื่อหาพ่อและแม่ที่แท้จริงและตอบคำถามท้ายกิจกรรม

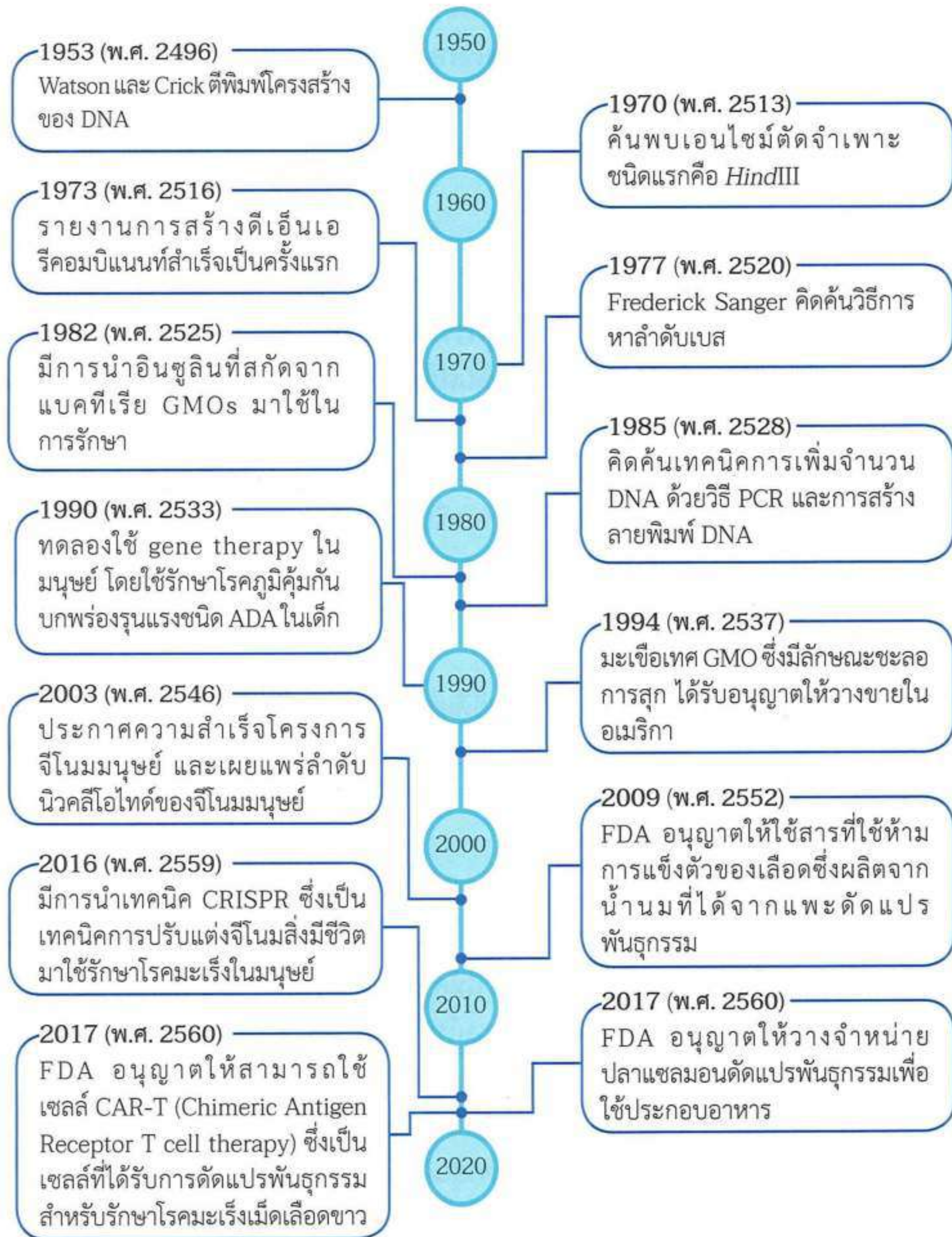


รูป 2 ผลลายพิมพ์ DNA ของบุคคล 4 คน ที่กล่าวอ้างเป็นพ่อแม่ของเด็ก

คำถามท้ายกิจกรรม

- จากการวิเคราะห์บุคคล 4 คน บุคคลใดบ้างที่มีโอกาสเป็นพ่อและแม่ของเด็ก เพราะเหตุใด
- จากการวิเคราะห์บุคคล 4 คน ตำแหน่ง STR ซึ่งวิเคราะห์โดยไพรเมอร์คู่ที่ 2 มีจำนวนแอลลีลทั้งหมดเท่าใด
- ถ้าวิเคราะห์ STR โดยใช้ไพรเมอร์คู่ที่ 1 และ 2 ข้อมูลที่ได้จะสามารถระบุบุคคลที่เป็นพ่อและแม่ของเด็กได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมีการวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวาง และมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้เกิดความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ดังรูป 6.21



รูป 6.21 ตัวอย่างการค้นพบ งานวิจัย และผลผลิตที่ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

6.4 เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอกับความปลอดภัยทางชีวภาพและชีวจริยธรรม

เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดข้อกังวลเกี่ยวกับผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น การใช้เทคโนโลยีเหล่านี้จึงควรคำนึงถึงความปลอดภัยทางชีวภาพและชีวจริยธรรม เช่น ความปลอดภัยต่อชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ การป้องกันการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ การปฏิบัติต่อสิ่งมีชีวิตอย่างมีคุณธรรม นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงมุมมองทางสังคมในด้านอื่น ๆ อีกด้วย

ตัวอย่างข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีดีเอ็นเอในการตรวจคัดกรองโอกาสในการเกิดโรคหรือยีนก่อโรค และการใช้ฐานข้อมูลทางพันธุกรรมของประชาชน

- สิทธิมนุษยชน จากการใช้เทคโนโลยีดีเอ็นเอในการตรวจคัดกรองโอกาสในการเกิดโรคหรือยีนก่อโรค และการใช้ฐานข้อมูลทางพันธุกรรมของประชาชน ในแง่ของการให้สิทธิ์ว่าใครที่สามารถเข้าถึงข้อมูลและใช้ประโยชน์จากข้อมูล และอาจทำให้เกิดการสร้างเงื่อนไขในการคัดเลือกคนเข้าทำงาน การทำประกันชีวิต หรืออื่นๆ
- จริยธรรมในการคัดเลือกตัวอ่อนสิ่งมีชีวิต จากการทำลายตัวอ่อนที่มีลักษณะที่ไม่ต้องการรวมถึงการยุติการตั้งครรภ์ ซึ่งอาจขัดต่อหลักจริยธรรม

ตัวอย่างข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีดีเอ็นเอในการสร้าง GMO

การสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม ทั้งเพื่อใช้ประโยชน์จากสิ่งมีชีวิตโดยตรงและใช้ผลิตภัณฑ์จากสิ่งมีชีวิตนั้น ก่อให้เกิดข้อกังวลต่าง ๆ เช่น

- สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม จะมีโอกาสสร้างสารที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์หรือไม่
- ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติจากการที่สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมแพร่กระจายเข้าสู่ระบบนิเวศ หรืออาจทำให้ความหลากหลายทางชีวภาพลดลง
- จริยธรรมในการใช้สัตว์ทดลอง จริยธรรมในการสร้างสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะแตกต่างไปจากธรรมชาติเพียงเพื่อตอบสนองความต้องการหรือความอยากรู้อยากเห็นของมนุษย์
- การผูกขาดทางการค้า จากการจดสิทธิบัตรและผูกขาดการขายเมล็ดพันธุ์หรือสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม รวมถึงการกำหนดราคาสินค้าโดยเจ้าของสิทธิบัตร

ในแง่ของข้อกังวลบางด้านนั้นทางองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้ให้ข้อคิดเห็นไว้ เช่น

ข้อกังวล	ข้อคิดเห็นจากองค์การอนามัยโลก
อาหารที่มีส่วนผสมของสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมหรือผลิตภัณฑ์ของสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจะกระตุ้นให้เกิดภูมิแพ้ในตัวผู้บริโภคได้หรือไม่	โดยหลักการแล้ว ไม่ส่งเสริมให้มีการถ่ายยีนจากสิ่งมีชีวิตที่อาจกระตุ้นให้เกิดภูมิแพ้ไปยังสิ่งมีชีวิตอื่น นอกจากจะสามารถพิสูจน์ได้ว่าโปรตีนที่สร้างจากยีนที่ถูกถ่ายไปนั้นไม่ก่อให้เกิดภูมิแพ้ ซึ่งปัจจุบัน ยังไม่พบผลกระทบจากสารก่อภูมิแพ้ที่เป็นผลจากอาหารที่มีส่วนผสมของสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมซึ่งมีวางขายในตลาด
มีโอกาสเกิดการถ่ายยีนจากสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม ไปยังจีโนมของมนุษย์หรือแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารหรือไม่ โดยเฉพาะถ้ายีนดังกล่าวเป็นยีนต้านยาปฏิชีวนะซึ่งมักถูกใช้ในการคัดเลือกในขั้นตอนการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม	การถ่ายยีนจากอาหารมีส่วนผสมของสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมเข้าสู่เซลล์ของมนุษย์หรือแบคทีเรียในทางเดินอาหารนั้นมีความเป็นไปได้ต่ำ นอกจากนี้ยังมีการสนับสนุนให้ใช้เทคโนโลยีการถ่ายยีนที่ไม่ต้องใช้ยีนต้านยาปฏิชีวนะ
เป็นไปได้หรือไม่ที่จะมีการผสมข้าม (outcrossing) ระหว่างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมกับสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันหรือสปีชีส์ใกล้เคียงกันในธรรมชาติ รวมทั้งการปะปนกันของเมล็ดพันธุ์พืชดัดแปรพันธุกรรมกับพืชไร่ทั่วไป	มีรายงานเกี่ยวกับกรณีดังกล่าว จากการที่พืชดัดแปรพันธุกรรมที่ได้รับอนุญาตสำหรับใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ ได้ถูกพบในปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคสำหรับมนุษย์ ในหลายประเทศนั้นได้มีการวางแนวทางเพื่อลดการปะปน ซึ่งรวมถึงการแยกพื้นที่แปลงปลูกพืชดัดแปรพันธุกรรมและพืชไร่ทั่วไป

(สามารถอ่านข้อมูลเพิ่มเติมข้อคิดเห็นเกี่ยวกับอาหารที่มีส่วนผสมของสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมจากองค์การอนามัยโลก และฉบับแปลภาษาไทยโดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้จาก QR code ของบท)



กิจกรรมเสนอแนะ : ประโยชน์และข้อควรคำนึงถึงในการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

จุดประสงค์

1. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และอภิปรายแนวทางในการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาใช้ประโยชน์ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางชีวภาพ ชีวจริยธรรม และผลกระทบต่อสังคม
2. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และอธิบายความน่าเชื่อถือของแหล่งข้อมูล

วิธีการทำกิจกรรม

ให้นักเรียนเลือกตัวอย่างเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอที่ถูกนำมาใช้จริงเพื่อสืบค้นข้อมูลและอภิปรายในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. ประโยชน์ของเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอที่นักเรียนเลือก
2. ความปลอดภัยทางชีวภาพ ชีวจริยธรรม และผลกระทบต่อสังคม
3. ตัวอย่างแนวทางป้องกันและแก้ไขเกี่ยวกับผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ

ตัวอย่างเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้จริง เช่น

- กรณีการนำมะละกอดัดแปรพันธุกรรมที่ต้านทานโรคพืชใบด่างจุดวงแหวนมาปลูก
- กรณีการขายเนื้อปลาแซลมอนดัดแปรพันธุกรรมที่เติบโตเร็วกว่าปลาแซลมอนปกติเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบประกอบอาหาร
- กรณีการนำยุงดัดแปรพันธุกรรมเพศผู้มาปล่อยในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อผสมพันธุ์กับยุงเพศเมียในธรรมชาติจะมีลูกที่ตายก่อนที่จะสืบพันธุ์ได้
- กรณีการจัดทำฐานข้อมูลทางพันธุกรรมของประชาชนเพิ่มเติมจากการใช้ข้อมูลลายนิ้วมือ
- กรณีการตรวจสอบการเป็นโรคทางพันธุกรรมของตัวอ่อนในครรภ์

? นักเรียนคิดว่าเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมีประโยชน์และความจำเป็นต่อมนุษย์หรือไม่ เพราะเหตุใด

? ยกตัวอย่างแนวทางป้องกันและแก้ไขเกี่ยวกับผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอที่นักเรียนคิดว่าน่าสนใจและเป็นประโยชน์

เมื่อเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอก้าวไปในระดับหนึ่ง คำถามเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นในสังคม อย่างไรก็ดี ทุกคนควรมีสิทธิ์ในการรับทราบความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและใช้ข้อมูลต่าง ๆ ในการวิเคราะห์อย่างถี่ถ้วนรอบคอบ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจในการร่วมกันวางแผนการใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีต่าง ๆ ในอนาคต ซึ่งข้อมูลข่าวสารจากทั้งฝ่ายสนับสนุนและฝ่ายคัดค้านการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ นั้นอาจมีทั้งข้อมูลที่เป็นจริง ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากความจริง และข้อมูลที่เกินความจริง นอกจากนี้ยังมีทั้งข้อมูลที่มาจากแหล่งที่น่าเชื่อถือและไม่น่าเชื่อถือ นักเรียนควรสืบค้นข้อมูลให้รอบด้านและอาศัยข้อมูลที่น่าเชื่อถือในการตัดสินใจสนับสนุนหรือคัดค้านไม่ว่าจะเป็นฝ่ายใด นอกจากนี้ทุกคนมีสิทธิ์ที่จะตัดสินใจและแสดงความคิดเห็น จึงควรรับฟังและยอมรับในความเห็นของทุกฝ่ายแม้ว่าจะเป็นความคิดเห็นที่แตกต่างจากตนเองก็ตาม



สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

1. การตัดต่อและถ่ายยีนที่ต้องการเข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยใช้เทคนิคพันธุวิศวกรรมจะได้สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมที่มีสมบัติตามต้องการหรือมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

2. การสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์อาจทำได้โดยการใช้เอนไซม์ตัดจำเพาะตัดสาย DNA จากนั้นใช้เอนไซม์ดีเอ็นเอไลเกสเชื่อมสาย DNA ที่ถูกตัดแล้วกับ DNA ชิ้นอื่นให้มาต่อกัน

3. การโคลนยีนทำได้โดยใช้พลาสมิดของแบคทีเรียในการสร้างดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์แล้วนำไปเพิ่มจำนวนโดยการถ่ายดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์เข้าสู่เซลล์แบคทีเรีย

4. การเพิ่มจำนวน DNA ด้วยเทคนิค PCR สามารถเพิ่มปริมาณของ DNA บริเวณที่ต้องการจากดีเอ็นเอแม่แบบที่มีปริมาณน้อยผ่านกระบวนการจำลอง DNA ซ้ำกันหลาย ๆ รอบในหลอดทดลอง

5. วิธีเจลอิเล็กโทรฟอรีซิสเป็นเทคนิคการแยกโมเลกุล DNA ที่มีขนาดแตกต่างกันในสนามไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่เป็นวุ้น สามารถใช้หาขนาดของโมเลกุล DNA ได้โดยเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลดีเอ็นเอมาตรฐาน

6. ความรู้เกี่ยวกับข้อมูลยีนที่ทำหน้าที่ควบคุมลักษณะที่สนใจ รวมทั้งหน้าที่ของยีนและโปรตีนที่สังเคราะห์ขึ้น และความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอสามารถใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้

7. ในด้านการแพทย์และเภสัชกรรม เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ได้ปริมาณมาก สะดวก รวดเร็ว และทำให้การรักษามีความปลอดภัยต่อผู้ป่วยมากยิ่งขึ้น

8. การประยุกต์ใช้เพื่อการวินิจฉัยโรค ทำให้ตรวจพบได้รวดเร็ว มีความจำเพาะ แม้ผู้ป่วยจะเป็นพาหะหรือยังไม่แสดงอาการของโรค และวางแผนการรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

9. การประยุกต์ใช้เพื่อการรักษาโรคทางพันธุกรรมรวมถึงอาการผิดปกติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากยีน โดยการถ่ายแอลลีลที่ปกติเข้าสู่เซลล์หรือเนื้อเยื่อที่แสดงอาการผิดปกติ หรือแก้ไขยีนในตำแหน่งที่ผิดปกติในจีโนมได้อย่างจำเพาะ

10. ในด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืชและสัตว์ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการปรับปรุงพันธุ์แบบดั้งเดิม และสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมทำให้ได้สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะตามต้องการ และการใช้ผลิตภัณฑ์จากสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมในกระบวนการผลิตสินค้าในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้ได้สารที่ต้องการในปริมาณมากในเวลารวดเร็ว สะดวก และลดต้นทุนการผลิต และมีการศึกษาเพื่อนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอมาประยุกต์ใช้ในด้านสิ่งแวดล้อม

11. ในด้านนิติวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัตถุพยานทางชีววิทยา ใช้พิสูจน์ตัวบุคคลหรือพิสูจน์ความสัมพันธ์ทางสายเลือดได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

12. การใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอควรจะเป็นไปโดยระมัดระวัง และคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในด้านต่าง ๆ รวมทั้งความปลอดภัยทางชีวภาพ และชีวจริยธรรม



แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

1. จงใส่เครื่องหมายถูก (√) หน้าข้อความที่ถูกต้องใส่เครื่องหมายผิด (×) หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง และขีดเส้นใต้เฉพาะคำหรือส่วนของข้อความที่ไม่ถูกต้อง และแก้ไขโดยตัดออกหรือเติมคำหรือข้อความที่ถูกต้องลงในช่องว่าง

..... 1.1 เอนไซม์ตัดจำเพาะแต่ละชนิดตัดสาย DNA ได้เป็นปลายทู่หรือปลายเหนียว อย่างใดอย่างหนึ่ง

....

..... 1.2 เมื่อตัดสาย DNA ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะชนิดหนึ่งได้ปลายทู่ และตัดพลาสมิดด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะอีกชนิดหนึ่งได้ปลายทู่ จะสามารถต่อชิ้น DNA กับพลาสมิดได้ถึงแม้ถูกตัดด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะต่างชนิดกัน

....

..... 1.3 ถ้าใช้เอนไซม์ตัดจำเพาะ *Xma*I ตัดสาย DNA และใช้ *Xcy*I ตัดพลาสมิด จะสามารถต่อชิ้น DNA กับพลาสมิดได้

....

..... 1.4 โมเลกุล DNA มีประจุรวมเป็นบวก

....

..... 1.5 เมื่ออยู่ในอะกาโรสเจลเดียวกัน โมเลกุล DNA สายตรงขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าได้เร็วกว่าโมเลกุล DNA สายตรงขนาดใหญ่

....

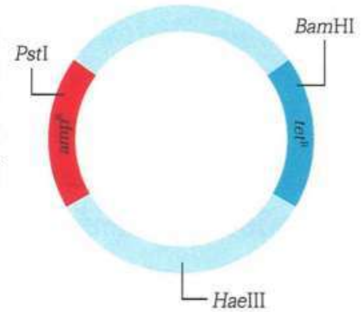
..... 1.6 อะกาโรสเจลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าจะทำให้ขนาดช่องว่างภายในอะกาโรสเจลเล็กลง จึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของชิ้น DNA

....

..... 1.7 ชิ้น DNA ขนาดเท่ากันจะเคลื่อนที่ในอะกาโรสเจลที่มีความเข้มข้นสูงได้เร็วกว่าในอะกาโรสเจลที่มีความเข้มข้นต่ำ

....

2. จากภาพแสดงพลาสมิดที่มียีนต้านยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลิน (amp^R) และยีนต้านยาปฏิชีวนะเตตราไซคลิน (tet^R) โดยที่ภายในยีน amp^R มีตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Pst*I และภายในยีน tet^R มีตำแหน่งตัดจำเพาะของเอนไซม์ *Bam*HI ถ้ามีชิ้น DNA แทรกภายในยีนต้านยาปฏิชีวนะใด ๆ ตรงตำแหน่งที่เอนไซม์ตัด จะทำให้ยีนนั้นไม่ทำงาน



จงใส่เครื่องหมายถูก (√) หน้าข้อความที่ถูกต้อง ใส่เครื่องหมายผิด (×) หน้าข้อความที่ไม่ถูกต้อง และขีดเส้นใต้เฉพาะคำหรือส่วนของข้อความที่ไม่ถูกต้อง และแก้ไขโดยตัดออกหรือเติมคำหรือข้อความที่ถูกต้องลงในช่องว่าง

..... 2.1 ถ้าตัดพลาสมิดด้วยเอนไซม์ *Pst*I แล้วใส่ DNA ที่ตัดด้วยเอนไซม์ชนิดเดียวกัน แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดนี้จะเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่เตตราไซคลิน แต่เจริญไม่ได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่แอมพิซิลลิน

....

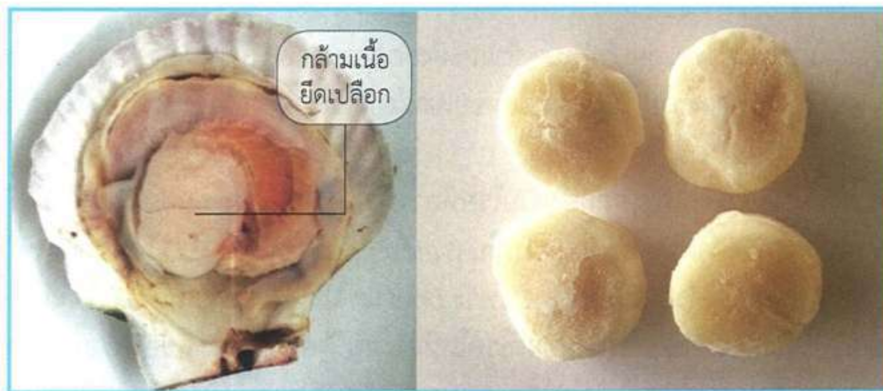
..... 2.2 ถ้าตัดพลาสมิดด้วยเอนไซม์ *Hae*III แล้วใส่ DNA ที่ตัดด้วยเอนไซม์ชนิดเดียวกัน แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิดนี้จะเจริญไม่ได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใส่ยาปฏิชีวนะเตตราไซคลิน

....

..... 2.3 ถ้าตัดพลาสมิดด้วยเอนไซม์ *Hae*III และ *Pst*I พร้อมกันจะได้ DNA 3 ชิ้น

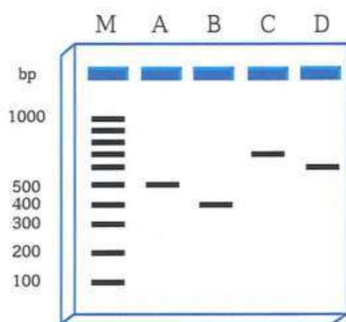
....

3. หอยเชลล์แช่แข็งส่วนมากที่วางขายตัดมาเฉพาะส่วนกล้ามเนื้อยึดเปลือก

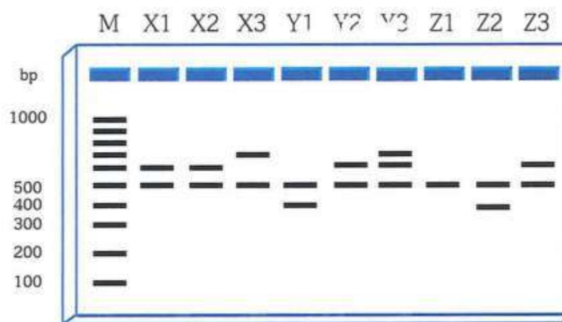


หอยเชลล์แบบมีเปลือก กล้ามเนื้อยึดเปลือกของหอยเชลล์

หอยเชลล์สปีชีส์ A B C และ D มีกล้ามเนื้อยึดเปลือกที่คล้ายกันมากจนไม่สามารถแยกได้จากลักษณะภายนอก ทำให้บางครั้งมีการนำสปีชีส์ B C และ D ซึ่งราคาถูกกว่ามาขายปนกับสปีชีส์ A ที่มีราคาแพง บริษัทที่ทำธุรกิจนำเข้าและส่งออกอาหารทะเลจึงมีการสุ่มตรวจหอยเชลล์แช่แข็งที่วางขายและติดป้ายบอกว่าเป็นสปีชีส์ A ซึ่งผลิตจาก 3 โรงงาน คือ X Y และ Z โรงงานละ 3 ถุงจากร้านค้าต่าง ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ DNA โดยใช้เครื่องหมายพันธุกรรมว่ามีการปลอมปนหอยเชลล์หรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับ DNA ที่ทราบขนาด (M) ผลการตรวจหอยเชลล์สปีชีส์ A B C และ D ได้ผลดังแผนภาพที่ 1 และผลการตรวจหอยเชลล์จากโรงงาน X Y และ Z ได้ผลดังแผนภาพที่ 2



แผนภาพที่ 1



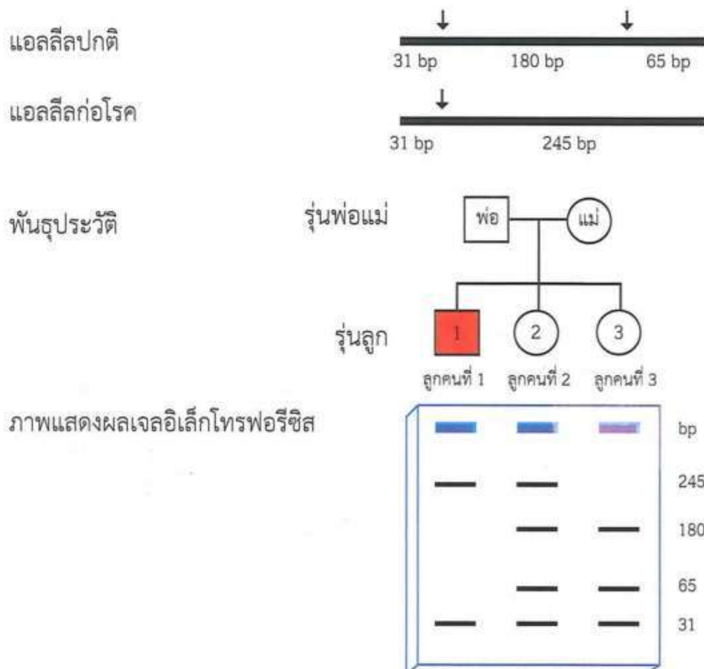
แผนภาพที่ 2

3.1 โรงงานใดมีการปลอมปนหอยเชลล์มากสปีชีส์ที่สุด และมีหอยเชลล์ที่ไม่ใช่สปีชีส์ A กี่ชนิด อะไรบ้าง และทราบได้อย่างไร

3.2 ถ้านักเรียนทำงานอยู่บริษัทนำเข้าและส่งออกอาหารทะเลและต้องการหาซื้อหอยเชลล์สปีชีส์ A เพื่อส่งขายทั่วโลก จะซื้อหอยเชลล์จากโรงงาน X Y และ Z หรือไม่ เพราะเหตุใด

4. โรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ซึ่งเป็นโรคที่ควบคุมโดยแอลลีลด้อยบนออโตโซม เกิดจากลำดับเบส GAG ตำแหน่งหนึ่งภายในยีน β *globin* เปลี่ยนเป็น GTG โดย DNA ที่มีลำดับเบส GAG ถูกตัดได้ด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ *Dde*I แต่ DNA ที่ลำดับเบส GTG จะไม่สามารถถูกตัดได้ และการศึกษาการถ่ายทอดโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ของครอบครัวหนึ่งที่มีลูก 3 คน โดยลูกคนที่ 1 เป็นโรค ส่วนลูกคนที่ 2 และ 3 ไม่แสดงอาการของโรค ดังแสดงในพันธุประวัติ และเมื่อใช้เอนไซม์ตัดจำเพาะ *Dde*I ตัดชิ้นยีนและนำไปตรวจสอบด้วยเจลอิเล็กโทรฟอรีซิสได้ผลดังภาพ

กำหนดให้ (↓) เป็นตำแหน่งตัดจำเพาะด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ *Dde*I

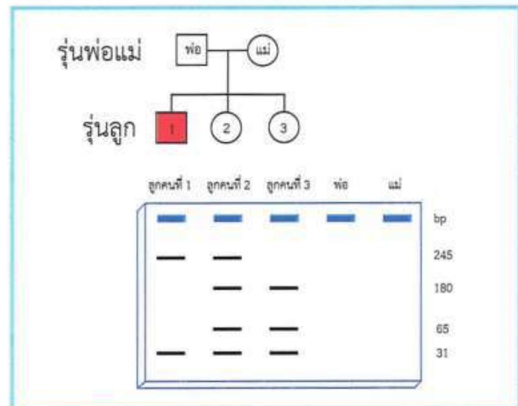


4.1 จากผลการตรวจ DNA ข้างต้น ลูกคนที่ 2 และ 3 มีแอลลีลก่อโรคหรือไม่

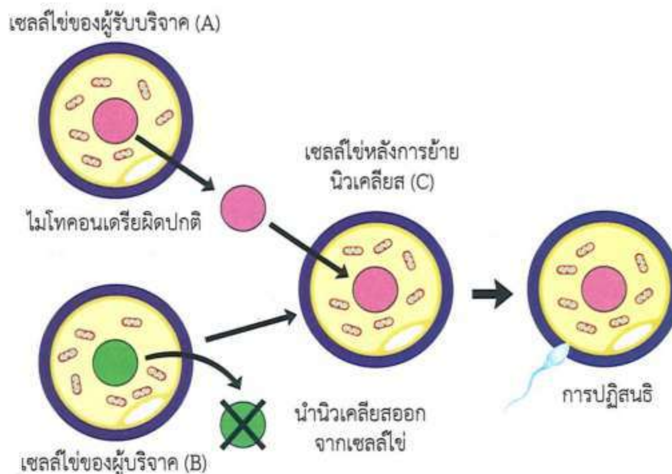
4.2 พ่อและแม่ไม่เป็นโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ ถ้าตรวจ DNA ในยีน β *globin* ของพ่อและแม่ ผลการทำเจลอิเล็กโทรฟอรีซิสเป็นอย่างไร จงเขียนแถบ DNA ลงในภาพและเขียนแอลลีลลงในพันธุประวัติ

โดยกำหนดให้

- แอลลีล *A* เป็นแอลลีลปกติ
- แอลลีล *a* เป็นแอลลีลก่อโรค



5. การเกิดมิวเทชันในไมโทคอนเดรียเป็นสาเหตุของการเกิดโรคได้ จึงมีการคิดวิธีที่จะทำเด็กหลอดแก้ว สำหรับแม่ที่มีไมโทคอนเดรียผิดปกติ โดยใช้เซลล์ไข่ที่ได้รับจากผู้บริจาคที่มีไมโทคอนเดรียปกติ โดยวิธีนี้มีการนำเอานิวเคลียสของเซลล์ไข่จากแม่ที่มีไมโทคอนเดรียผิดปกติออกมาใส่ในเซลล์ไข่ของผู้บริจาคซึ่งได้นำนิวเคลียสออกแล้ว หลังจากนั้นจึงนำอสุจิจากพ่อมาผสม ดังภาพ

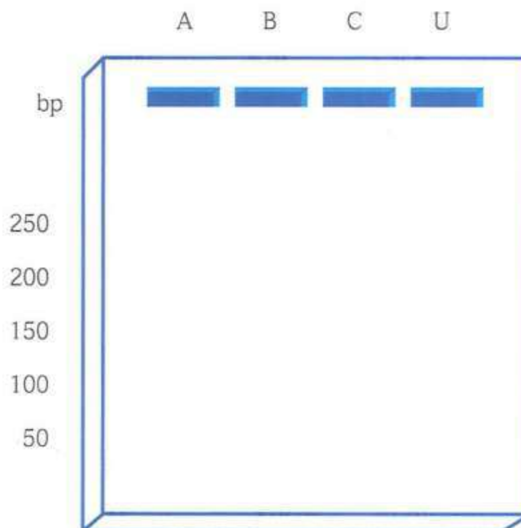


เมื่อนำผลิตภัณฑ์จาก PCR ของยีนในไมโทคอนเดรียของเซลล์ไข่จากผู้รับบริจาค (A) และเซลล์ไข่จากผู้บริจาค (B) มาตัดด้วยเอนไซม์ *Hae*III

กำหนดให้ (↓) เป็นตำแหน่งตัดจำเพาะด้วยเอนไซม์ตัดจำเพาะ *Hae*III

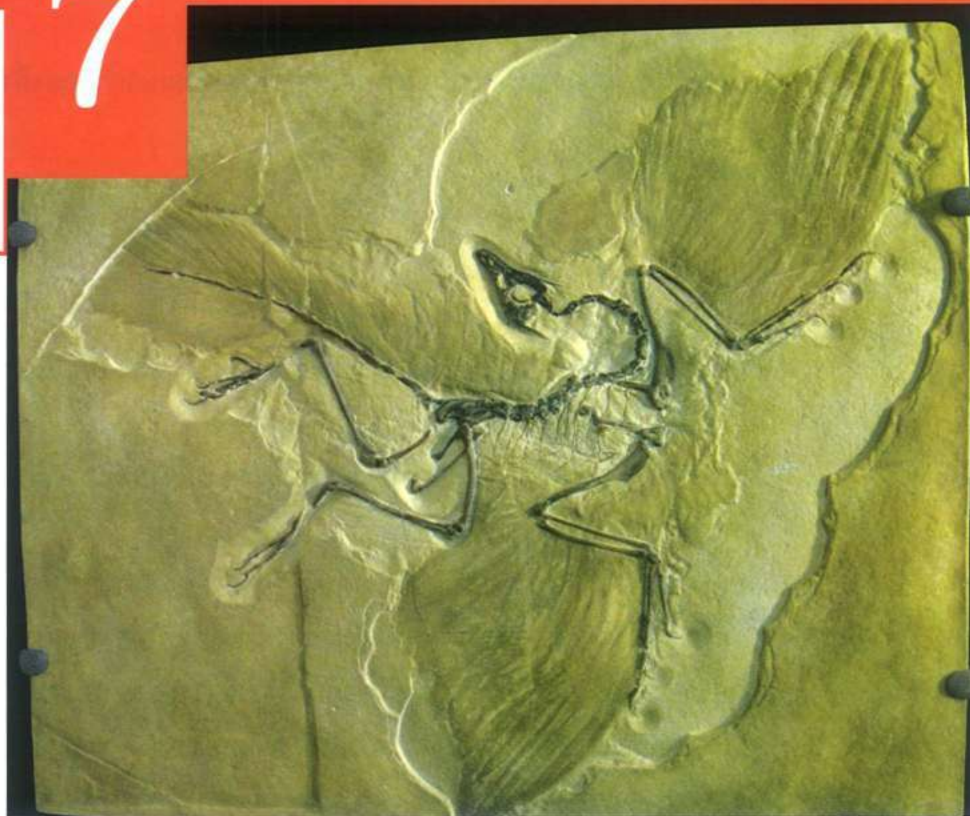


แถบ DNA ของยีนบนไมโทคอนเดรียที่ตรวจสอบได้จากการตัดด้วยเอนไซม์ *Hae*III ของเซลล์ไข่ของผู้รับบริจาค (A) เซลล์ไข่ของผู้บริจาค (B) เซลล์ไข่หลังการย้ายนิวเคลียส (C) และ DNA ของยีนบนไมโทคอนเดรียที่ไม่ได้ตัดด้วยเอนไซม์ *Hae*III (U) ควรเป็นอย่างไร ให้เขียนแถบ DNA ลงในแผนภาพ



บทที่ 7 | วิวัฒนาการ


goo.gl/bGcFby



ซากดึกดำบรรพ์ของอาร์คีออพเทอริกซ์ *(Archaeopteryx)* ซึ่งมีอายุประมาณ 150 ล้านปี แสดงให้เห็นถึงร่องรอยที่ชัดเจนของการมีขนแบบขนนก (feather) ที่บริเวณปีกและหาง จึงมีการสันนิษฐานว่าเป็นบรรพบุรุษของนก แต่มีลักษณะบางอย่างคล้ายสัตว์เลื้อยคลาน เช่น กระดูกหางยาว ฟันขนาดเล็ก ขามีเกล็ด จากหลักฐานดังกล่าวนี้เป็นไปได้หรือไม่ว่านกและสัตว์เลื้อยคลานในปัจจุบันจะมีบรรพบุรุษร่วมกัน แต่ทั้งคู่ต่างมีวิวัฒนาการของตนเอง จนกระทั่งปัจจุบันมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน





คำถามสำคัญ

สิ่งแวดล้อมและพันธุกรรมมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตอย่างไร



จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สืบค้นข้อมูล อภิปราย วิเคราะห์ และสรุปหลักฐานต่าง ๆ ที่สนับสนุน และข้อมูลที่ใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
2. สืบค้นข้อมูล และอธิบายเกี่ยวกับกฎการใช้และไม่ใช้ และกฎการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่ของลามาร์ก
3. สืบค้นข้อมูล และอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติของดาร์วิน และยกตัวอย่างวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตซึ่งผ่านการคัดเลือกโดยธรรมชาติ
4. อภิปรายและเปรียบเทียบแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์กและดาร์วิน
5. อธิบายหลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก และระบุเงื่อนไขของสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก
6. คำนวณหาความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์ของประชากรโดยใช้หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก
7. สืบค้นข้อมูล อธิบาย และสรุปปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์ในประชากรที่ส่งผลต่อวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
8. อธิบาย และยกตัวอย่างแนวคิดเกี่ยวกับความหมายของสปีชีส์ด้านต่าง ๆ
9. อธิบาย และยกตัวอย่างการแยกเหตุการสืบพันธุ์
10. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายกำเนิดสปีชีส์



ตรวจสอบความรู้ก่อนเรียน

ให้นักเรียนใส่เครื่องหมายถูก (√) หรือผิด (×) หน้าข้อความตามความเข้าใจของนักเรียน

1. สิ่งมีชีวิตมีการถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรมจากรุ่นสู่รุ่นผ่านสารพันธุกรรม
2. ความแปรผันทางพันธุกรรมเป็นผลมาจากการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิสและไมโทซิส
3. สิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันจะมีข้อมูลทางพันธุกรรมเหมือนกัน แต่จะแตกต่างจากสิ่งมีชีวิตสปีชีส์อื่น
4. พี่น้องร่วมพ่อแม่มีความหลากหลายแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างเซลล์สืบพันธุ์และการรวมกันของเซลล์สืบพันธุ์
5. ประชากร คือ กลุ่มสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ร่วมกันในแหล่งที่อยู่เดียวกันในช่วงเวลาเดียวกัน
6. การเกิดมิวเทชันทำให้เกิดลักษณะทางพันธุกรรมใหม่ และลูกที่ได้จะเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดใหม่ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากพ่อแม่

7.1 หลักฐานและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต

นกจัดเป็นสัตว์ที่ประสบความสำเร็จทางวิวัฒนาการกลุ่มหนึ่ง ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่ามีบรรพบุรุษร่วมกันกับสัตว์เลื้อยคลาน นกมีการปรับตัวทางวิวัฒนาการหลายด้านเพื่อให้บินได้ ทั้งในด้านของปีก ขน กระดูกที่เบาและแข็งแรง และระบบหายใจที่มีประสิทธิภาพสูง ความสามารถในการบินทำให้นกแพร่กระจายไปได้ทั่วโลก แต่กว่าจะมีลักษณะเหล่านี้ได้นั้น นกต้องผ่านการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมมาทีละเล็กทีละน้อย เมื่อผ่านไปเป็นระยะเวลานานลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะถูกสะสมจนมีลักษณะที่แตกต่างไปจากบรรพบุรุษ จึงอาจกล่าวได้ว่า **วิวัฒนาการ** (evolution) เป็นการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมในประชากรสิ่งมีชีวิตไปตามเวลาที่ผ่านไป จนทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นมีลักษณะต่าง ๆ แตกต่างไปจากเดิม **ทราบหรือไม่ว่ามีหลักฐานและข้อมูลใดบ้างที่บ่งบอกถึงวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต**

7.1.1 ซากดึกดำบรรพ์

เมื่อพืชหรือสัตว์ตายลงมักจะถูกย่อยสลายจนไม่มีซากที่สมบูรณ์เหลืออยู่ โดยเฉพาะซากสิ่งมีชีวิตที่มีอายุนับล้านปี แต่ในบางครั้งซากหรือร่องรอยของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะยังคงเหลืออยู่ในรูปของ **ซากดึกดำบรรพ์** (fossil) เช่น ซากสิ่งมีชีวิตในชั้นหิน ซากแมลงในอำพัน รอยพิมพ์ใบไม้ ดังรูป 7.1



ความรู้เพิ่มเติม

อำพัน (amber) เป็นยางไม้ที่แข็งเป็นก้อนมีสีเหลืองใส เป็นเงา


ไทรโลไบท์


ปะการัง


ปลา


แมลงในอำพัน


ผีเสื้อ


แอมโมไนต์


ไม้กลายเป็นหิน


เฟิน

รูป 7.1 ตัวอย่างซากดึกดำบรรพ์

ซากดึกดำบรรพ์เปรียบเสมือนการบันทึกเหตุการณ์ที่สนับสนุนว่าสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เคยปรากฏอยู่บนโลกในอดีต แต่ในปัจจุบันสิ่งมีชีวิตหลายชนิดเหล่านั้นได้สูญพันธุ์ไปแล้ว เช่น ไดโนเสาร์ แมมมอธ แต่อาจพบสิ่งมีชีวิตบางชนิดในปัจจุบันซึ่งยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกับที่พบมาตั้งแต่อดีต เช่น แมงดาทะเล หอยงวงช้าง หวายทะนอย แปะก๊วย (รูป 7.2) เรียกสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ว่าเป็น **สิ่งมีชีวิตคงสภาพดึกดำบรรพ์** (living fossil)



แมงดาทะเล



หอยงวงช้าง



หวายทะนอย



แปะก๊วย

รูป 7.2 สิ่งมีชีวิตคงสภาพดึกดำบรรพ์

ถ้าพิจารณาซากดึกดำบรรพ์ในหินตะกอนชั้นต่าง ๆ ดังรูป 7.3 **โครงสร้างซากดึกดำบรรพ์ที่พบในหินชั้นล่างกับหินชั้นบนแตกต่างกันหรือไม่ ซากดึกดำบรรพ์ที่พบในหินชั้นใดมีลักษณะใกล้เคียงกับสิ่งมีชีวิตในปัจจุบันมากที่สุด และซากดึกดำบรรพ์ที่พบในหินชั้นใดมีอายุมากที่สุด เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น**



รูป 7.3 ซากดึกดำบรรพ์ในหินตะกอนชั้นต่าง ๆ



เชื่อมโยงโลก ดาราศาสตร์ และอวกาศ

หินตะกอนเกิดจากการทับถมของตะกอนหรือวัตถุที่เกิดจากการผุพังของหิน โดยมีวัตถุประสาน เช่น $CaCO_3$ SiO_2 ที่ทำให้เนื้อหินจับกันแน่น ตัวอย่างของหินตะกอน เช่น หินปูน หินทราย หินดินดาน ซึ่งมักจะพบซากดึกดำบรรพ์ในหินปูนมากกว่าหินชนิดอื่น

นักวิทยาศาสตร์สามารถประมาณอายุของซากดึกดำบรรพ์ได้จากอายุของชั้นหินตะกอนที่ซากดึกดำบรรพ์ฝังตัวอยู่ โดยทั่วไปแล้วซากดึกดำบรรพ์ที่มีอายุมากกว่าจะอยู่ในหินชั้นล่างที่มีอายุมากกว่า และซากดึกดำบรรพ์ที่มีอายุน้อยกว่าจะพบอยู่ในหินชั้นบนที่มีอายุน้อยกว่า ดังนั้นหลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์จึงบอกลำดับการเกิดของสิ่งมีชีวิตบนโลกได้ นอกจากนี้ซากดึกดำบรรพ์ที่มีอายุน้อยกว่าจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีลักษณะใกล้เคียงกับสิ่งมีชีวิตในปัจจุบันมากกว่าซากดึกดำบรรพ์ที่มีอายุมากจึงบ่งชี้ให้เห็นถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตจากอดีตจนถึงปัจจุบันอีกด้วย



เชื่อมโยงโลก ดาราศาสตร์ และอวกาศ

การประมาณอายุของซากดึกดำบรรพ์ที่อยู่ในหินตะกอน สามารถเปรียบเทียบได้กับชั้นหินที่ทราบอายุที่อยู่ติดกัน ซึ่งการหาอายุของชั้นหินทำได้โดยคำนวณจากปริมาณที่เหลืออยู่ของธาตุกัมมันตรังสีกับปริมาณของธาตุที่เกิดจากการสลายของธาตุกัมมันตรังสีนั้น เช่น ยูเรเนียม-238 เป็นธาตุกัมมันตรังสีในชั้นหิน ต่อมามีการสลายตัวจนได้ตะกั่ว-206 ดังนั้นอายุของชั้นหินคำนวณได้จากค่าครึ่งชีวิตของยูเรเนียม (4.5 พันล้านปี) และปริมาณของยูเรเนียมและตะกั่วที่พบในชั้นหิน เรียกวิธีนี้ว่า **การหาอายุจากกัมมันตรังสี** (radiometric dating)

การศึกษาวิวัฒนาการโดยอาศัยหลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์นั้น ชิ้นส่วนของซากดึกดำบรรพ์ต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์พอสมควรจึงสามารถอธิบายเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ได้ ดังตัวอย่างการค้นพบซากดึกดำบรรพ์ของม้าในสมัย (epoch) ต่าง ๆ ทำให้สามารถอธิบายเกี่ยวกับวิวัฒนาการของม้าจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้ (รูป 7.4)

สมัย	ลักษณะตัว	ความสูง (นิ้ว)	ลักษณะนิ้วเท้า	ลักษณะฟันกราม
อีโอซีน (Eocene) 56-34 ล้านปีมาแล้ว	*Hyracotherium*	11		
โอลิโกซีน (Oligocene) 34-23 ล้านปีมาแล้ว	*Mesohippus*	24		
ไมโอซีน (Miocene) 23-5 ล้านปีมาแล้ว	*Merychippus*	40		
พลิโอซีน (Pliocene) 5-2.6 ล้านปีมาแล้ว	*Pliohippus*	43		
ไพลสโตซีน (Pleistocene) 2.6 ล้านปีมาแล้ว - 1 หมื่นปีมาแล้ว	*Equus*	50		

รูป 7.4 วิวัฒนาการของม้า

? จากภาพแสดงวิวัฒนาการของม้าในสมัยไมโอซีนจนมาถึงสมัยพลิโอซีน มีลักษณะใดบ้างที่เปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใช้เวลานานเท่าใด



กรณีศึกษา


ไทรโลไบท์

ศึกษาข้อมูลจำนวนของซากดึกดำบรรพ์ไทรโลไบท์ (trilobite) ที่พบซึ่งมีความยาวต่าง ๆ กันโดยพบในชั้นของหินตะกอนที่มีความลึกต่างกัน ดังในตารางข้างล่างนี้

ความยาวของซากดึกดำบรรพ์ (cm)	จำนวนซากดึกดำบรรพ์ที่พบในชั้นหินที่ลึกไม่มาก (ชั้นหินตื้น)	จำนวนซากดึกดำบรรพ์ที่พบในชั้นหินที่ลึกมาก (ชั้นหินลึก)
3.0	0	0
3.5	0	4
4.0	2	12
4.5	5	18
5.0	12	23
5.5	18	24
6.0	22	23
6.5	24	19
7.0	22	11
7.5	19	6
8.0	13	2
8.5	4	0
9.0	0	0

 นำข้อมูลด้านบนมาเขียนเป็นกราฟ

 จากข้อมูลข้างต้น แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการได้อย่างไร



กิจกรรมเสนอแนะ : ซากดึกดำบรรพ์ของสิ่งมีชีวิต

จุดประสงค์

1. สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับซากดึกดำบรรพ์ที่ค้นพบทั้งในประเทศไทยหรือในต่างประเทศ
2. อภิปราย และสรุปความสำคัญเกี่ยวกับซากดึกดำบรรพ์ที่นำมาเป็นหลักฐานสนับสนุนการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
3. นำเสนอข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ ในชั้นเรียน

วิธีการทำกิจกรรม

สืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับซากดึกดำบรรพ์ของสิ่งมีชีวิตที่ค้นพบทั้งในประเทศไทย หรือในต่างประเทศแล้วนำมาอภิปราย ซึ่งประเด็นในการอภิปรายมีดังนี้

? ซากดึกดำบรรพ์ที่ศึกษามีลักษณะใกล้เคียงกับสิ่งมีชีวิตกลุ่มใด เพราะเหตุใดจึงจัดอยู่ในกลุ่มสิ่งมีชีวิตดังกล่าว

? ซากดึกดำบรรพ์นี้มีลักษณะแตกต่างจากสิ่งมีชีวิตในกลุ่มที่กล่าวข้างต้นอย่างไร

? ซากดึกดำบรรพ์นี้สนับสนุนการเกิดวิวัฒนาการได้อย่างไร

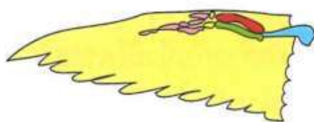
อย่างไรก็ตามหลักฐานซากดึกดำบรรพ์อาจไม่เพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการ เนื่องจากซากดึกดำบรรพ์ที่ค้นพบมักไม่สมบูรณ์ หรืออาจถูกทำลายจากธรรมชาติ หรือยังไม่ถูกค้นพบ นอกจากนี้อาจมีสิ่งมีชีวิตอีกหลายชนิดที่ไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นซากดึกดำบรรพ์ได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักฐานอื่น ๆ มาสนับสนุนเพิ่มเติม ซึ่งจะได้ศึกษาต่อไป

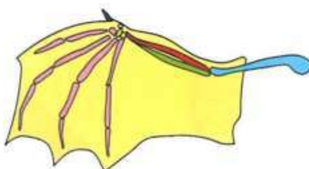
7.1.2 กายวิภาคเปรียบเทียบ

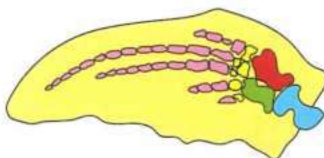
โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายกันจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่สิ่งมีชีวิตบางชนิดมีรูปร่างลักษณะภายนอกแตกต่างกัน ซึ่งไม่น่าจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่เมื่อศึกษา **กายวิภาคเปรียบเทียบ** (comparative anatomy) แล้วกลับพบว่าโครงสร้างภายในมีความคล้ายกัน เช่น การเปรียบเทียบรยางค์คู่หน้าของสัตว์มีกระดูกสันหลังบางชนิดดังรูป 7.5 **ความคล้ายคลึงกันของกระดูกรยางค์เหล่านี้จะบอกถึงความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการหรือไม่ อย่างไร**

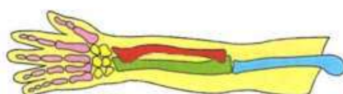


ขาหน้าของจระเข้ (เดิน)



ปีกของนก (บิน)



ปีกของค้างคาว (บิน)

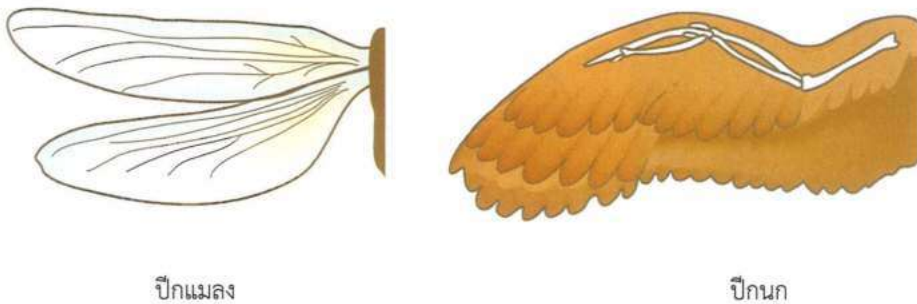


ครีบใบพายของวาฬ (ว่ายน้ำ)



แขนของมนุษย์ (จับ)

รูป 7.5 หลักฐานกายวิภาคเปรียบเทียบโครงสร้างและหน้าที่ของรยางค์คู่หน้าในสัตว์มีกระดูกสันหลังบางชนิด

จากรูป 7.5 เมื่อศึกษาโครงสร้างโดยพิจารณากระดูกรยางค์คู่หน้าของสัตว์มีกระดูกสันหลังกลุ่มนี้เปรียบเทียบกันแล้ว พบว่าประกอบด้วยกระดูกรยางค์ที่คล้ายกัน แต่ทำหน้าที่แตกต่างกันเพื่อการดำรงชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า **โครงสร้างกำเนิดเดียวกัน** (homologous structure) ซึ่งเป็นหลักฐานที่สนับสนุนว่า สัตว์มีกระดูกสันหลังกลุ่มนี้มีวิวัฒนาการมาจากบรรพบุรุษร่วมกัน

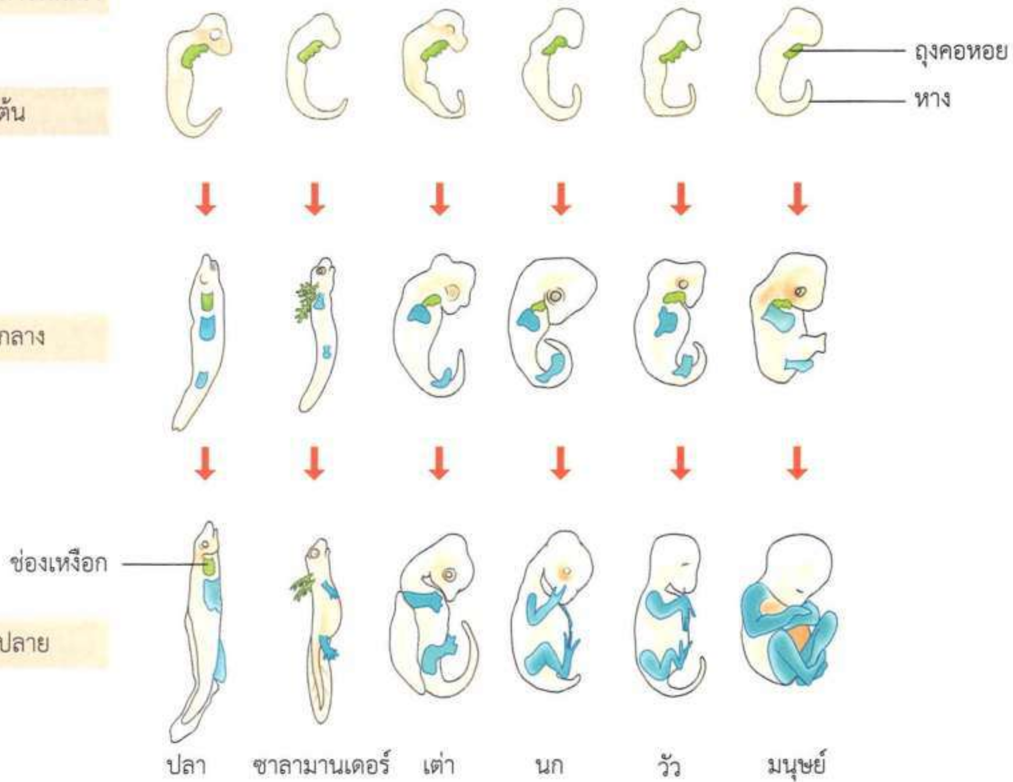
ในขณะที่สิ่งมีชีวิตบางชนิดที่มีลักษณะบางประการคล้ายกัน เช่น ปีกนกกับปีกแมลง ซึ่งพัฒนามาเพื่อทำหน้าที่ในการบินเหมือนกัน แต่พบว่ามีโครงสร้างทางกายวิภาคที่แตกต่างกัน เนื่องจากวิวัฒนาการมาจากบรรพบุรุษที่แตกต่างกันจึงมีโครงสร้างต้นกำเนิดที่ต่างกัน โดยเรียกโครงสร้างที่ทำหน้าที่คล้ายกันแต่มีต้นกำเนิดต่างกันนี้ว่า **โครงสร้างกำเนิดต่างกัน** (analogous structure) ดังรูป 7.6



รูป 7.6 หลักฐานกายวิภาคเปรียบเทียบแสดงโครงสร้างของปีกแมลงและปีกนก

7.1.3 วิทยาเอ็มบริโอ

ในบางกรณีที่ข้อมูลจากการศึกษากายวิภาคเปรียบเทียบในระยะตัวเต็มวัยของสิ่งมีชีวิตไม่ชัดเจนเพียงพอ การศึกษาด้าน**วิทยาเอ็มบริโอ** (embryology) ซึ่งเปรียบเทียบการเจริญเติบโตในระยะเอ็มบริโอสามารถใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตได้ ดังรูป 7.7 **การเจริญเติบโตระยะใดที่มีความคล้ายกันมาก เพราะเหตุใด และการพัฒนาในระยะปลายของคนมีรูปร่างคล้ายกับสิ่งมีชีวิตใดมากที่สุด**



รูป 7.7 พัฒนาการของเอ็มบริโอของสัตว์มีกระดูกสันหลังบางชนิด

จากการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอของสัตว์มีกระดูกสันหลังระยะต้น จะเห็นว่ามีอวัยวะบางอย่างที่คล้ายกัน เช่น ถุงคอหอย (pharyngeal pouch) และหาง เป็นต้น เมื่อเจริญต่อมาในระยะปลาย ถุงคอหอยในปลาและซาลามานเดอร์จะพัฒนาเปิดเป็นช่องเหงือก (gill slit หรือ pharyngeal slit) แต่ถุงคอหอยในสัตว์อื่นได้ปรับเปลี่ยนไปในระหว่างการเจริญเติบโตเพื่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต เช่น ในมนุษย์ถุงคอหอยบางส่วนเปลี่ยนเป็นท่อยูสเตเชียน (eustachian tube) เพื่อทำหน้าที่ปรับความดันในหูส่วนกลาง เป็นต้น ส่วนหางยังคงพบอยู่ในสัตว์หลายชนิดยกเว้นมนุษย์

จากความคล้ายกันของโครงสร้างต่าง ๆ ในระยะเอ็มบริโอนี้ เป็นหลักฐานที่สนับสนุนว่าสัตว์มีกระดูกสันหลังเหล่านี้ต่างมีวิวัฒนาการมาจากบรรพบุรุษร่วมกัน แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างที่เกิดขึ้นในระยะปลายซึ่งทำให้เอ็มบริโอของสัตว์เหล่านี้มีลักษณะแตกต่างกันเป็นผลมาจากการเกิดวิวัฒนาการเพื่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันนั่นเอง

7.1.4 ชีววิทยาโมเลกุล

หลักฐานทาง**ชีววิทยาโมเลกุล** (molecular biology) เป็นหลักฐานที่ได้จากข้อเท็จจริงที่ว่าสิ่งมีชีวิตมี DNA เป็นสารพันธุกรรม หลักฐานทางชีววิทยาโมเลกุลนี้ใช้บอกถึงความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกันทางวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตได้ ดังตัวอย่างการเปรียบเทียบร้อยละของลำดับกรดแอมิโนที่เหมือนกันในสายฮีโมโกลบินระหว่างมนุษย์ ลิงรีซัส หนู ไก่ กบ และปลาปากกลม ในตาราง 7.1 **จากตารางจะอธิบายความใกล้ชิดกันทางด้านวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ กับมนุษย์ได้อย่างไร**

ตาราง 7.1 เปรียบเทียบร้อยละของลำดับกรดแอมิโนที่เหมือนกันในสายฮีโมโกลบินระหว่างมนุษย์ ลิงรีซัส หนู ไก่ กบ และปลาปากกลม

สิ่งมีชีวิต	ร้อยละของลำดับกรดแอมิโนที่เหมือนกันในสายฮีโมโกลบินเมื่อเปรียบเทียบกับมนุษย์
มนุษย์	100
ลิงรีซัส	95
หนู	87
ไก่	69
กบ	54
ปลาปากกลม	14

จากตาราง 7.1 จะเห็นว่ามนุษย์น่าจะมีความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการที่ใกล้ชิดกันกับลิงรีซัสมากกว่าสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น เนื่องจากมีร้อยละของลำดับกรดแอมิโนในฮีโมโกลบินที่เหมือนกันมากกว่าสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ด้วยเหตุนี้หลักฐานจากการศึกษาชีววิทยาโมเลกุลจึงเป็นหลักฐานสำคัญที่ใช้สนับสนุนหลักฐานอื่น ๆ และยังสามารถศึกษาข้ามกลุ่มสิ่งมีชีวิตได้ เช่น สัตว์มีกระดูกสันหลังและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังซึ่งไม่สามารถศึกษาได้จากกายวิภาคเปรียบเทียบ หรือจากการศึกษาทางวิทยาเอ็มบริโอ



ความรู้เพิ่มเติม

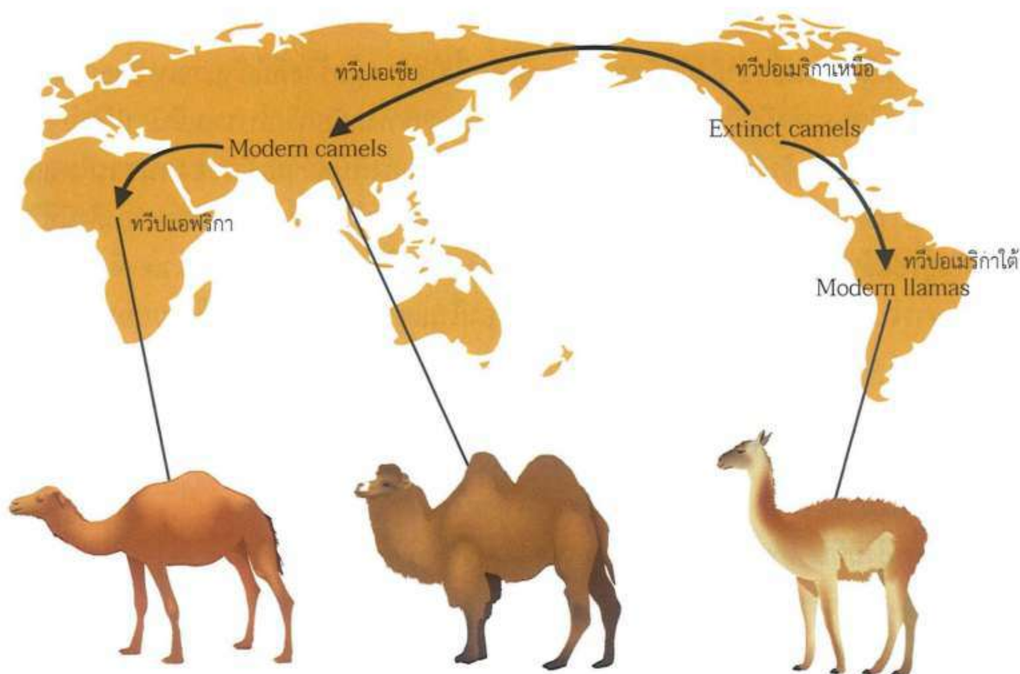
อัตราการเกิดวิวัฒนาการระดับโมเลกุลจะค่อนข้างคงที่สำหรับโปรตีนแต่ละชนิด เช่น ฮีโมโกลบินมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกรดแอมิโน 1 โมเลกุลต่อ 5.8 ล้านปี ในขณะที่ไซโทโครมซีในไมโทคอนเดรียมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกรดแอมิโน 1 โมเลกุลต่อ 20 ล้านปี เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์จึงสามารถใช้จำนวนกรดแอมิโนที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อคำนวณเวลาในการเกิดสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตว่ามีวิวัฒนาการแยกออกจากบรรพบุรุษมาแล้วประมาณกี่ล้านปี

ที่มา : Freeman, W.H. (2000). *An introduction to genetic analysis* (7th ed). New York: Griffiths AJF, Miller JH, Suzuki DT, et al.

7.1.5 การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์

หลักฐาน**การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์** (geological distribution) เป็นหลักฐานที่ได้จากการศึกษาสิ่งมีชีวิตที่แพร่กระจายในบริเวณต่าง ๆ บนพื้นโลก ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกัน และมีจำนวนมากหลากหลายสปีชีส์ **การศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์นี้จะบ่งบอกถึงวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตได้อย่างไร**

การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตในปัจจุบันนั้นเป็นผลมาจากการกระจายแพร่พันธุ์ของบรรพบุรุษสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ จากบริเวณที่เป็นจุดกำเนิด และยิ่งบริเวณที่แต่ละสิ่งมีชีวิตแพร่กระจายไปห่างไกลกันมากก็อาจจะยิ่งมีความแตกต่างของสภาพแวดล้อมซึ่งทำให้สิ่งมีชีวิตมีวิวัฒนาการที่ต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น อูฐและลามาซึ่งมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันทางสายวิวัฒนาการ แต่พบว่ามีการแพร่กระจายของอูฐและลามาในสองทวีปที่อยู่ห่างไกลกัน โดยจะพบอูฐในแอฟริกาและเอเชีย ในขณะที่พบลามาในอเมริกาใต้ ดังรูป 7.8 **เพราะเหตุใดอูฐและลามาที่แพร่กระจายอยู่ในบริเวณที่อยู่ห่างไกลกันในปัจจุบัน จึงมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกันทางสายวิวัฒนาการ**



รูป 7.8 การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตในบริเวณต่าง ๆ

จากหลักฐานการแพร่กระจายของอูฐในเอเชียและลามาในอเมริกาใต้ นำไปสู่ข้อสันนิษฐานว่า ถ้าเอเชียและอเมริกาเคยเชื่อมต่อกันมาก่อน ดังนั้นน่าจะเคยมีบรรพบุรุษของอูฐในอเมริกาเหนือ แต่ต่อมาได้สูญพันธ์ไป ข้อสันนิษฐานนี้ได้รับการยืนยันในเวลาต่อมาเมื่อมีการขุดค้นพบซากดึกดำบรรพ์ของอูฐในอเมริกาเหนือ นอกจากนี้ยังมีหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อประมาณ 40 ล้านปีมาแล้วมีบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างเอเชียและอเมริกาเหนือซึ่งปัจจุบันนี้ถูกแยกจากกัน ในช่วงเวลานั้นสัตว์ในอเมริกาและเอเชียจึงสามารถแพร่กระจายแลกเปลี่ยนกันได้ และต่อมาต่างมีวิวัฒนาการแยกจากกันจนกระทั่งปัจจุบัน จะเห็นว่าการศึกษาการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์และหลักฐานต่าง ๆ ทั้งด้านธรณีวิทยามีส่วนช่วยให้สามารถตั้งข้อสันนิษฐานและเข้าใจเกี่ยวกับกำเนิดและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตได้ดียิ่งขึ้น

จากข้อมูลและหลักฐานต่าง ๆ ที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าสิ่งมีชีวิตในแต่ละช่วงเวลาจากอดีตที่ผ่านมามีการเปลี่ยนแปลงและเกิดวิวัฒนาการขึ้น **นักเรียนคิดว่าแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตมีลำดับความเป็นมาอย่างไร**

7.2 แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต

ในอดีตมีความเชื่อว่าสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ บนโลกนี้เกิดจากผู้สร้างที่มีอำนาจเหนือธรรมชาติ ทำให้จำนวนและชนิดของสิ่งมีชีวิตคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จนกระทั่งสมัยกรีกโบราณมีนักปรัชญาหลายท่านได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตซึ่งขัดแย้งกับความเชื่อของคนส่วนใหญ่ในยุคนั้น ต่อมาเมื่อมีการค้นพบซากดึกดำบรรพ์ของสิ่งมีชีวิตในชั้นหินทำให้เห็นถึงร่องรอยของสิ่งมีชีวิตในอดีตที่สูญพันธุ์ไปแล้ว อีกทั้งสภาพภูมิศาสตร์ของโลกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงเชื่อว่าสิ่งมีชีวิตน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในแต่ละยุคสมัย ทำให้เริ่มยอมรับว่าสิ่งมีชีวิตมีวิวัฒนาการ และเกิดแนวคิดเกี่ยวกับการเกิดวิวัฒนาการ ดังนี้

7.2.1 แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์ก

ชอง ลามาร์ก (Jean Lamarck) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษาเปรียบเทียบสิ่งมีชีวิตที่พบในยุคนั้นกับซากดึกดำบรรพ์ที่ได้รวบรวมไว้ในพิพิธภัณฑ์ และได้เสนอแนวคิดเพื่ออธิบายว่าสิ่งมีชีวิตมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้เข้ากับสภาพแวดล้อมขณะเกิดวิวัฒนาการ โดยอาศัยหลักการ 2 ประการ ดังนี้

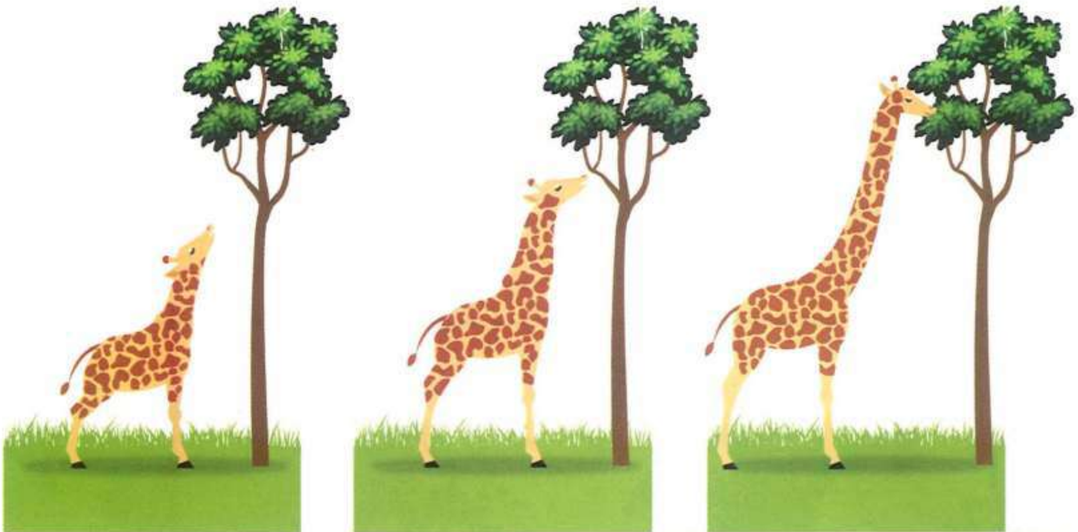


รูป 7.9 ชอง ลามาร์ก

โครงสร้างใดที่มีการใช้งานมากจะมีขนาดใหญ่และแข็งแรงขึ้น ขณะที่โครงสร้างที่ไม่ได้ใช้งานจะอ่อนแอและเสื่อมลงไป แนวคิดดังกล่าวนี้เรียกว่า **กฎการใช้และไม่ใช้** (law of use and disuse)

โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นภายในชั่วรุ่นสามารถถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกได้ แนวคิดดังกล่าวนี้ เรียกว่า **กฎการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่** (law of inheritance of acquired characteristics)

ลามาร์กได้ใช้แนวคิดทั้งสองแนวคิดในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยีราฟที่มีคอยาวในปัจจุบัน เนื่องจากในอดีตยีราฟต้องแก่งแย่งแข่งขันกับสัตว์กินพืชชนิดอื่น จึงพยายามยืดคอเพื่อกินยอดไม้เป็นอาหาร ทำให้คอยาวขึ้น ลักษณะคอที่ยาวขึ้นนี้สามารถถ่ายทอดจากรุ่นพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้ ทำให้ยีราฟมีคอยาวขึ้นเป็นลำดับในแต่ละชั่วรุ่น ดังรูป 7.10



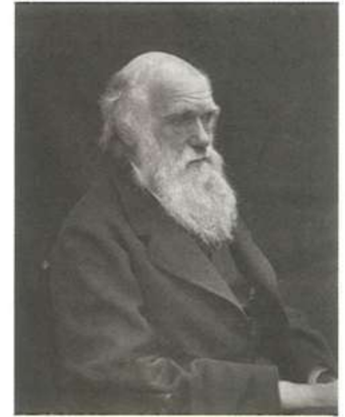
รูป 7.10 แนวคิดของลามาร์กเกี่ยวกับยีราฟที่มีลักษณะคอยาว

แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์กซึ่งอาศัยกฎทั้งสองนั้น เป็นแนวคิดที่ไม่มีหลักฐานสนับสนุนว่าสามารถเกิดขึ้นได้จริง ทำให้ไม่ได้รับการยอมรับจากนักวิทยาศาสตร์ในสมัยนั้น อย่างไรก็ตามแนวคิดของลามาร์กได้กระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มคิดว่าวิวัฒนาการเกิดขึ้นได้อย่างไร

? ยกตัวอย่างกรณีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสิ่งมีชีวิตที่ไม่เป็นไปตามแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของลามาร์ก พร้อมให้เหตุผล

7.2.2 แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของดาร์วิน

ชาลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin) นักธรรมชาติวิทยาชาวอังกฤษ ได้เสนอทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ เพื่ออธิบายกลไกการเกิดวิวัฒนาการ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน **ทฤษฎีนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร และมีแนวคิดอย่างไร**



รูป 7.11 ชาลส์ ดาร์วิน

ดาร์วินได้เดินทางสำรวจสิ่งมีชีวิตในทวีปอเมริกาใต้และหมู่เกาะต่าง ๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิก (รูป 7.12) ขณะเดินทางได้รวบรวมและบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับพืช สัตว์ และซากดึกดำบรรพ์ที่พบ ซึ่งทำให้ดาร์วินเกิดข้อสงสัยมากมาย ดังเช่น

- เหตุใดในบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมคล้ายคลึงกันแต่อยู่ห่างไกลกัน สิ่งมีชีวิตที่พบในทั้งสองบริเวณมีลักษณะไม่เหมือนกัน
- เหตุใดพืชและสัตว์ซึ่งอาศัยในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละเกาะของหมู่เกาะกาลาปากอส (Galapagos) จึงมีความแตกต่างกัน
- เหตุใดนกฟินช์ (finch) ที่พบในหมู่เกาะกาลาปากอสจึงมีความคล้ายกับนกฟินช์ที่พบในทวีปอเมริกาใต้



รูป 7.12 เส้นทางการเดินเรือของเรือ HMS Beagle ที่ดาร์วิน ร่วมเดินทางสำรวจ

เมื่อดาร์วินได้ศึกษาหนังสือ Principles of Geology ที่เขียนโดยชาลส์ ไลเอลล์ (Charles Lyell) ซึ่งกล่าวว่าโลกมีอายุหลายพันล้านปีและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทำให้ดาร์วินตั้งข้อสงสัยว่า ถ้าเปลือกโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นสิ่งมีชีวิตก็น่าจะมีการเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน

ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตที่น่าสนใจซึ่งดาร์วินได้เก็บรวบรวมกลับมา คือ นกฟินช์บนหมู่เกาะกาลาปากอส ซึ่งมีลักษณะจะงอยปากที่แตกต่างกันตามแต่ละเกาะ ทั้งรูปร่าง ความหนา ความยาวที่มีความเหมาะสมกับลักษณะของอาหารที่นกฟินช์แต่ละชนิดกิน เช่น เมล็ดพืช กระบองเพชร แมลงตัวเล็ก ๆ (รูป 7.13) **ความแตกต่างของจะงอยปากซึ่งมีความเหมาะสมกับอาหารชนิดต่าง ๆ ที่นกฟินช์แต่ละชนิดกินนั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร**



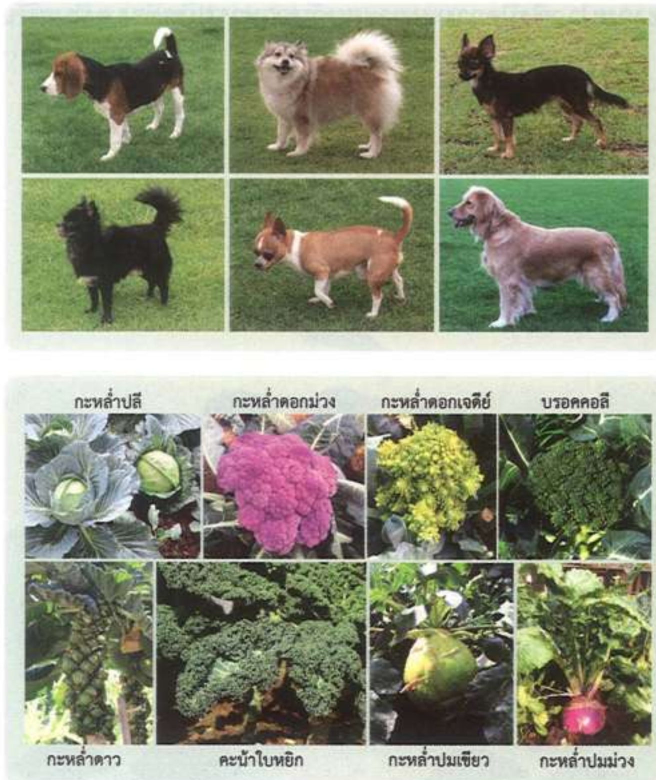
รูป 7.13 ลักษณะจะงอยปากที่แตกต่างกันของนกฟินช์สปีชีส์ต่าง ๆ

หลังเดินทางกลับจากการสำรวจ ดาร์วินพยายามอธิบายข้อสงสัยต่าง ๆ โดยหนึ่งในหลักฐานที่อ้างอิง คือ การคัดเลือกสายพันธุ์พืชเพื่อการเพาะปลูก และการคัดเลือกสายพันธุ์สัตว์เลี้ยงโดยมนุษย์ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสายพันธุ์ที่หลากหลายตามที่ต้องการได้ในไม่กี่ชั่วรุ่น



ความรู้เพิ่มเติม

มนุษย์สามารถคัดเลือกสิ่งมีชีวิตเพื่อให้ได้ลักษณะที่หลากหลายตามความต้องการ ซึ่งในบางกรณีลักษณะที่ถูกคัดเลือกไว้นั้นอาจไม่ได้เป็นลักษณะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตนั้น กระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า **การคัดเลือกโดยมนุษย์** (artificial selection) ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงสายพันธุ์สุนัข การปรับปรุงพันธุ์ของกะหล่ำป่า



นอกจากนี้เมื่อดาร์วินได้ศึกษาหนังสือ An Essay on the Principle of Population ที่เขียนโดยทอมัส มัลทัส (Thomus Malthus) ซึ่งกล่าวว่าประชากรมนุษย์มีศักยภาพที่จะเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วและมากกว่าความสามารถในการผลิตอาหาร ทำให้มีอาหารไม่เพียงพอและเกิดความอดอยาก เมื่อร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ภัยธรรมชาติ โรคภัยไข้เจ็บ สงคราม ทำให้การเพิ่มของประชากรมนุษย์ถูกจำกัด ดาร์วินจึงเกิดแนวคิดว่าในธรรมชาติปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ทำให้การเพิ่มของประชากรสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ถูกจำกัดเช่นกัน สมาชิกของประชากรที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะอยู่รอด ในขณะที่สมาชิกที่มีลักษณะไม่เหมาะสมก็จะหายไป

จากความรู้และหลักฐานต่าง ๆ ทำให้ดาร์วินเกิดแนวคิดเกี่ยวกับกลไกการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต นั่นคือสิ่งมีชีวิตในปัจจุบันนี้เป็นรุ่นลูกหลานที่มีลักษณะแตกต่างจากสิ่งมีชีวิตที่มีมาในอดีต โดยลักษณะที่เหมาะสมเท่านั้นจะถูกคัดเลือกให้คงอยู่ในสภาพแวดล้อมนั้น การที่สิ่งมีชีวิตมีลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมนี้เป็น **การปรับตัวเชิงวิวัฒนาการ** (evolutionary adaptation) ซึ่งอาจนำไปสู่**การเกิดสปีชีส์ใหม่** (speciation) ขึ้นได้ แนวคิดดังกล่าวของดาร์วิน เรียกว่า **การคัดเลือกโดยธรรมชาติ** (natural selection)

นักวิทยาศาสตร์ได้วิเคราะห์และสรุปว่า **ทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ** (theory of natural selection) ตามแนวคิดของดาร์วิน ประกอบด้วยข้อเท็จจริง 5 ข้อ และข้อสรุป 3 ข้อ ดังนี้

ข้อเท็จจริงที่ 1 สิ่งมีชีวิตทุกชนิดมีความสามารถในการสืบพันธุ์และให้กำเนิดลูกหลานจำนวนมาก
ข้อเท็จจริงที่ 2 จำนวนสมาชิกของประชากรแต่ละสปีชีส์ในแต่ละรุ่นมักมีจำนวนคงที่
ข้อเท็จจริงที่ 3 ปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตมีปริมาณจำกัด

จากข้อเท็จจริงที่ 1-3 ทำให้เกิดข้อสรุปที่ 1

ข้อสรุปที่ 1 สิ่งมีชีวิตมีการต่อสู้ดิ้นรนเพื่อการอยู่รอด และเพื่อให้ได้สิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตซึ่งมีจำนวนจำกัด จึงมีสมาชิกเพียงส่วนหนึ่งที่อยู่รอดในแต่ละรุ่น

ข้อเท็จจริงที่ 4 สมาชิกแต่ละตัวในประชากรมีลักษณะที่แตกต่างกัน นั่นคือมี**ความแปรผัน** (variation) ในทุกประชากร
ข้อเท็จจริงที่ 5 ความแปรผันในประชากรเป็นลักษณะที่ถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อไปโดยการสืบพันธุ์ได้

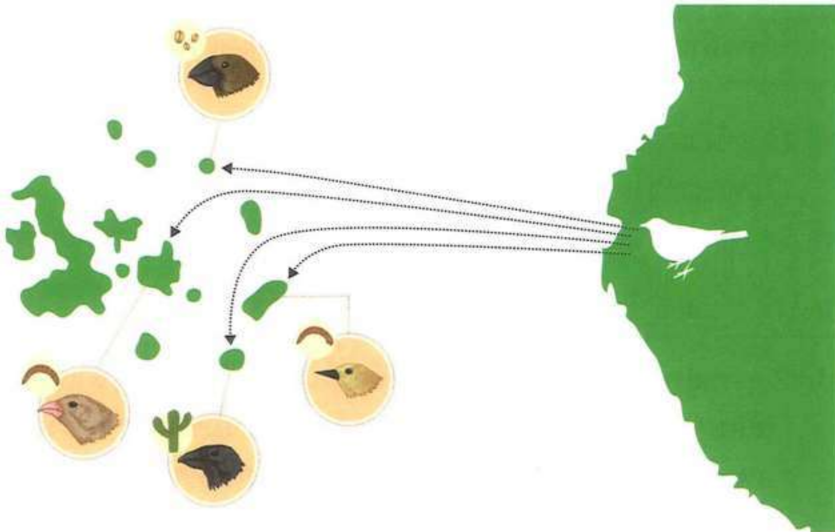
จากข้อเท็จจริงที่ 4 และ 5 ทำให้เกิดข้อสรุปที่ 2 และ 3

ข้อสรุปที่ 2 การอยู่รอดของสมาชิกในสิ่งแวดล้อมไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสุ่ม แต่เป็นผลมาจากลักษณะทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันของสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะให้กำเนิดลูกหลานได้มากกว่าสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม

ข้อสรุปที่ 3 การที่สมาชิกแต่ละตัวในประชากรมีศักยภาพในการอยู่รอดและให้กำเนิดลูกหลานไม่เท่ากัน ทำให้ประชากรเปลี่ยนแปลงไปทีละเล็กละน้อย และมีลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมสะสมเพิ่มขึ้นในแต่ละรุ่น

ทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาตินี้สามารถอธิบายความหลากชนิดของนกฟินช์ที่ดาร์วินพบในหมู่เกาะกาลาปากอสได้ โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษานกฟินช์เหล่านี้ในเวลาต่อมาได้ตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับนกฟินช์สปีชีส์ต่าง ๆ ในหมู่เกาะว่าน่าจะมีบรรพบุรุษร่วมกันซึ่งเป็นนกที่มาจากทวีปอเมริกาใต้ โดยประชากรนกกลุ่มแรกที่มายังเกาะอาจมีบางลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อย เช่น ลักษณะจะงอยปาก

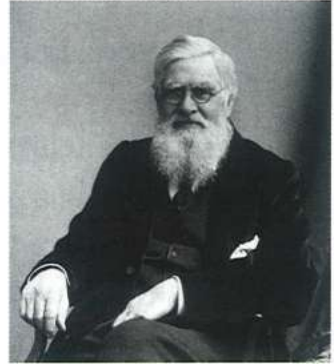
เมื่อบรรพบุรุษนกฟินช์เข้ามาอาศัยอยู่ในหมู่เกาะซึ่งมีสภาพแวดล้อมหลากหลายและแตกต่างกันไปในแต่ละเกาะ นกฟินช์ตัวที่มีจะงอยปากเหมาะสมกับชนิดของอาหารที่มีอยู่ในแหล่งที่อยู่นั้น ๆ จะมีลูกหลานได้มาก ทำให้มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น เช่น ตัวที่มีจะงอยปากหนาจะกินเมล็ดพืชที่มีเปลือกแข็งได้ดี หรือจะงอยปากที่เรียวแหลมสามารถจับแมลงได้ดี ส่วนตัวที่มีจะงอยปากไม่เหมาะสมต่อการหาอาหารที่มีในแหล่งที่อยู่นั้น ๆ จะมีลูกหลานน้อยกว่า ทำให้นกที่มีจะงอยปากไม่เหมาะสมนี้ค่อย ๆ ลดจำนวนลงจนหายไปในที่สุด ในขณะเดียวกันลักษณะอื่น ๆ ก็อาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกันด้วย กระบวนการนี้เป็นการคัดเลือกโดยธรรมชาติซึ่งจะเกิดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายชั่วรุ่น ในที่สุดจึงมีนกฟินช์สปีชีส์ต่าง ๆ ที่มีจะงอยปากและลักษณะอื่น ๆ แตกต่างไปจากรุ่นบรรพบุรุษ ดังรูป 7.14



รูป 7.14 วิวัฒนาการของนกฟินช์ในแต่ละเกาะผ่านกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ

 จากคำกล่าวที่ว่า "แมลงที่ได้รับสารฆ่าแมลงทำให้มีความต้านทานต่อสารฆ่าแมลงมากยิ่งขึ้น" นักเรียนเห็นด้วยกับคำกล่าวนี้หรือไม่ ให้เหตุผลประกอบ

แนวคิดเกี่ยวกับการคัดเลือกโดยธรรมชาติของดาร์วิน สอดคล้องกับแนวคิดของอัลเฟรด รัสเซล วอลเลซ (Alfred Russel Wallace) ซึ่งเป็นนักธรรมชาติวิทยาชาวอังกฤษเช่นเดียวกัน ต่อมาจึงมีการนำผลงานของทั้งสองคนร่วมกันเสนอต่อสมาคมลินเนียน (The Linnean Society) ในปี พ.ศ. 2401 หลังจากนั้นในปีต่อมาดาร์วินจึงได้ตีพิมพ์หนังสือชื่อ On the Origin of Species by Means of Natural Selection



รูป 7.15
อัลเฟรด รัสเซล วอลเลซ

การคัดเลือกโดยธรรมชาติตามแนวคิดของดาร์วินและวอลเลซเป็นการคัดเลือกประชากรที่สมาชิกของประชากรมีความแปรผันทางพันธุกรรม ทำให้มีลักษณะแตกต่างกันไป สมาชิกของประชากรที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะถูกคัดเลือกไว้และมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น แต่ดาร์วินยังไม่สามารถอธิบายได้ว่า ความแปรผันทางพันธุกรรมของประชากรเกิดขึ้นได้อย่างไรและมีการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นจากพ่อแม่ไปยังรุ่นลูกได้อย่างไร

ต่อมาเมื่อความรู้เกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของเมนเดลได้รับการยอมรับมากขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความแปรผันทางพันธุกรรมในประชากรขึ้น ประกอบกับต่อมาเมื่อความรู้ทางพันธุศาสตร์ประชากรก้าวหน้าขึ้น ทำให้สามารถเชื่อมโยงแนวคิดของดาร์วิน และแนวคิดของเมนเดลเข้าด้วยกัน และสามารถอธิบายกลไกการเกิดวิวัฒนาการได้สมบูรณ์ขึ้น



การเชื่อมโยงความรู้

หนังสือเรียนชีววิทยา เล่ม 1 เรื่องการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

? เพราะเหตุใดการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสิ่งมีชีวิตจึงมีความสำคัญต่อการคัดเลือกโดยธรรมชาติ

ปัจจุบันแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการจากการคัดเลือกโดยธรรมชาติเป็นการรวบรวมความรู้ทางด้านต่าง ๆ เช่น **บรรพชีวินวิทยา** (palaeontology) **อนุกรมวิธาน** (taxonomy) **ชีวภูมิศาสตร์** (biogeography) **ชีววิทยาโมเลกุล** (molecular biology) และ**พันธุศาสตร์ประชากร** (population genetics) นักวิทยาศาสตร์หลายคนได้ใช้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ เหล่านี้มาบูรณาการในการอธิบายวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตเพิ่มเติมจากแนวคิดของดาร์วิน จึงเรียกแนวคิดที่เกิดใหม่ว่า **ทฤษฎีสังเคราะห์ของวิวัฒนาการ** (synthetic theory of evolution)



ความรู้เพิ่มเติม

บรรพชีวินวิทยา เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในอดีตโดยใช้หลักฐานจากซากดึกดำบรรพ์

อนุกรมวิธาน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกสิ่งมีชีวิตเป็นหมวดหมู่ การกำหนดชื่อ และการระบุชื่อสิ่งมีชีวิต

ชีวภูมิศาสตร์ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตโดยอาศัยหลักฐานการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์



รู้หรือไม่

การคัดเลือกโดยธรรมชาติในชีวิตประจำวัน : การดื้อยาปฏิชีวนะ

นักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนายาปฏิชีวนะหลายชนิดเพื่อใช้รักษาโรคที่เกิดจากแบคทีเรีย การใช้ยาปฏิชีวนะทำให้แบคทีเรียบางสายพันธุ์ตายไป ขณะที่บางสายพันธุ์ที่สามารถต้านทานต่อยาปฏิชีวนะมีโอกาสอยู่รอดและเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น ขณะเดียวกันในธรรมชาติพบว่าแบคทีเรียอาจเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางพันธุกรรมในประชากรซึ่งเกิดจากมิวเทชัน ทำให้แบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะนั้น นักวิทยาศาสตร์จึงต้องพัฒนายาปฏิชีวนะที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น การดื้อยาของแบคทีเรียนอกจากจะเกิดขึ้นในระหว่างที่มีการใช้ยาปฏิชีวนะรักษาโรคแล้ว ยังอาจเกิดจากการได้รับยาปฏิชีวนะที่ติดมากับอาหาร เช่น การรับประทานเนื้อสัตว์ที่ได้รับยาปฏิชีวนะ เป็นต้น

7.3 พันธุศาสตร์ประชากร

ประชากร (population) หมายถึง สิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันที่อาศัยอยู่รวมกันในพื้นที่เดียวกันในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง และสามารถผสมพันธุ์ระหว่างกันได้ พันธุศาสตร์ประชากรจึงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลง**ความถี่ของแอลลีล** (allele frequency) และ**ความถี่ของจีโนไทป์** (genotype frequency) ที่เป็นองค์ประกอบทางพันธุกรรมของประชากร รวมทั้งปัจจัยที่ทำให้ความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์เปลี่ยนแปลงซึ่งนำไปสู่การเกิดวิวัฒนาการ

7.3.1 ความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์

ในแต่ละประชากรจะมียีนที่ควบคุมลักษณะต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมาก ยีนทั้งหมดที่มีอยู่ในประชากรในช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่า **ยีนพูล** (gene pool) ซึ่งประกอบด้วยแอลลีลที่ควบคุมลักษณะต่าง ๆ ทุกลักษณะของทุกยีนในประชากรนั้นโดยความถี่ของแอลลีล คือ จำนวนของแอลลีลใดแอลลีลหนึ่งในยีนพูลต่อแอลลีลทั้งหมดที่ควบคุมลักษณะนั้น

$$\text{ความถี่ของแอลลีล} = \frac{\text{จำนวนแอลลีลใดแอลลีลหนึ่งของยีนที่ต้องการศึกษาในยีนพูล}}{\text{จำนวนแอลลีลทั้งหมดของยีนที่ต้องการศึกษาในยีนพูล}}$$

สิ่งมีชีวิตที่เป็นดิพลอยด์ ในเซลล์ร่างกายแต่ละเซลล์จะมีจำนวนโครโมโซม 2 ชุด แต่ละยีนบนฮอมอโลกัสโครโมโซมจึงมีแอลลีลที่อยู่บนโลคัสเดียวกัน 2 แอลลีล เมื่อศึกษายีนหนึ่งในประชากรจำนวน 1,000 ตัว จึงมีจำนวนแอลลีลทั้งหมดของยีนที่ต้องการศึกษาในยีนพูล 2,000 แอลลีล ดังนั้นถ้ายีนหนึ่งมี 2 แอลลีลได้แก่ แอลลีล A และ แอลลีล a

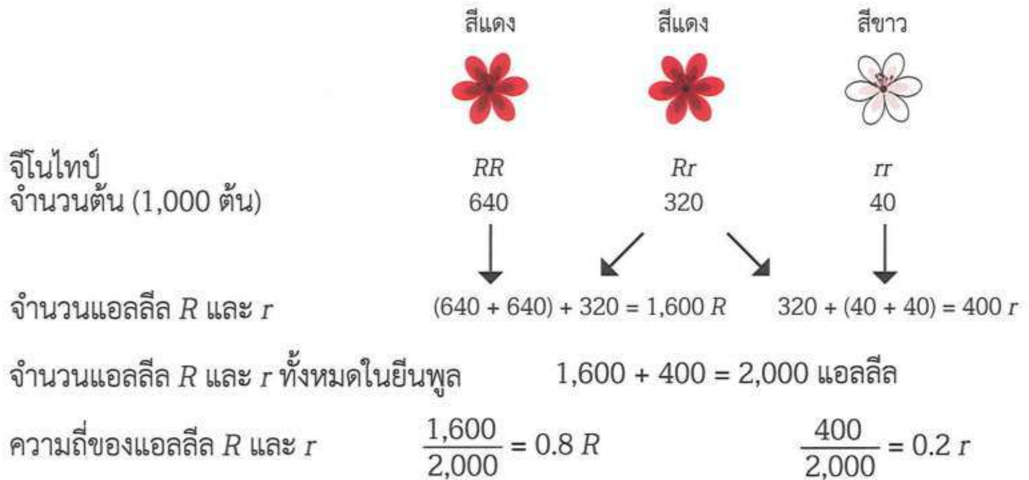
$$\text{ความถี่ของแอลลีล } A = \frac{\text{จำนวนแอลลีล } A \text{ ทั้งหมด}}{2{,}000}$$

$$\text{ความถี่ของแอลลีล } a = \frac{\text{จำนวนแอลลีล } a \text{ ทั้งหมด}}{2{,}000}$$

ตัวอย่างการหาความถี่ของแอลลีลในประชากรไม้ดอกชนิดหนึ่งที่ลักษณะสีดอกถูกควบคุมโดยยีนที่มี 2 แอลลีล คือ

แอลลีล R ควบคุมลักษณะดอกสีแดง เป็นลักษณะเด่น
แอลลีล r ควบคุมลักษณะดอกสีขาว เป็นลักษณะด้อย

ในประชากรไม้ดอกชนิดนี้ 1,000 ต้น มีดอกสีขาว 40 ต้น และดอกสีแดง 960 ต้น โดยดอกสีแดงที่มีจีโนไทป์แบบ *RR* มีจำนวน 640 ต้น และ *Rr* มีจำนวน 320 ต้น ความถี่ของแอลลีล *R* และ *r* สามารถหาได้ดังนี้



ในขณะเดียวกันสามารถหาความถี่ของจีโนไทป์ได้ ดังนี้

$$\text{ความถี่ของจีโนไทป์} = \frac{\text{จำนวนสมาชิกที่มีจีโนไทป์แต่ละแบบของยีนที่ต้องการศึกษา}}{\text{จำนวนสมาชิกทั้งหมดในประชากร}}$$

ดังนั้นในตัวอย่างประชากรไม้ดอกข้างต้น ซึ่งมีจีโนไทป์สำหรับยีนดังกล่าว 3 แบบ ได้แก่ *RR Rr* และ *rr* จะมีความถี่ของจีโนไทป์แต่ละแบบ ดังนี้

$$\text{ความถี่ของจีโนไทป์ } RR = \frac{640}{1,000} = 0.64$$

$$\text{ความถี่ของจีโนไทป์ } Rr = \frac{320}{1,000} = 0.32$$

$$\text{ความถี่ของจีโนไทป์ } rr = \frac{40}{1,000} = 0.04$$

ความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์ในประชากรนี้จะมีค่าเท่าเดิมหรือไม่ในชั่วรุ่นต่อ ๆ ไป หรือจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดจากสาเหตุใดได้บ้าง

7.3.2 หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก

ก็อดฟรีย์ ฮาโรลด์ ฮาร์ดี (Godfrey Harold Hardy) ชาวอังกฤษ และวิลเฮล์ม ไวน์เบิร์ก (Wilhelm Weinberg) ชาวเยอรมัน ต่างศึกษายีนพูลของประชากรและมีแนวคิดตรงกันว่า ความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์ในยีนพูลของประชากรจะมีค่าคงที่ในทุก ๆ ชั่วรุ่น ถ้าประชากรอยู่ในเงื่อนไขดังนี้

1. ประชากรต้องมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลแบบสุ่มมีโอกาสที่จะเกิดได้น้อย
2. ไม่มีการถ่ายเทหรือเคลื่อนย้ายยีนระหว่างประชากรจากการอพยพเข้าหรือออก จึงไม่มีการรับเพิ่มหรือสูญเสียแอลลีลเดิม ทำให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรไม่เปลี่ยนแปลง
3. ไม่เกิดมิวเทชัน เนื่องจากมิวเทชันอาจทำให้เกิดการหายไปหรือเพิ่มขึ้นของแอลลีล ทำให้ความถี่ของแอลลีลเปลี่ยนแปลงไปได้
4. สมาชิกทุกตัวมีโอกาสผสมพันธุ์ได้เท่ากัน หรือการผสมพันธุ์เป็นแบบสุ่ม นั่นคือสมาชิกทั้งหมดในประชากรไม่ว่าจะมีลักษณะหรือจีโนไทป์แบบใดก็ตาม มีโอกาสเท่ากันในการผสมพันธุ์ ซึ่งทำให้แต่ละแอลลีลมีโอกาสเท่ากันในการถ่ายทอดไปยังประชากรชั่วรุ่นต่อไป
5. ไม่เกิดการคัดเลือกโดยธรรมชาติ สมาชิกทุกตัวในประชากรมีโอกาสสืบพันธุ์ได้เท่ากัน และมีจำนวนลูกหลานได้เท่ากัน ทำให้แต่ละแอลลีลมีโอกาสเท่ากันในการถ่ายทอดไปยังประชากรชั่วรุ่นต่อไป และส่งผลให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรไม่เปลี่ยนแปลง

แนวคิดดังกล่าวนี้เรียกว่า **กฎฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก** (Hardy-Weinberg law) หรือ**หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก** (Hardy-Weinberg principle)

จากประชากรไม้ดอกข้างต้น จะเห็นว่าความถี่ของแอลลีลจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และความถี่ของแอลลีลทั้งสองรวมกัน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ นั่นคือ

ความถี่ของแอลลีล R + ความถี่ของแอลลีล r = 1
ดังนั้นจากตัวอย่างข้างต้น 0.8 + 0.2 = 1

ถ้าให้ p แทนความถี่ของแอลลีลเด่นซึ่งในกรณีนี้คือ R และ q แทนความถี่ของแอลลีลด้อยซึ่งในกรณีนี้คือ r ดังนั้น

$$p + q = 1$$

เมื่อเซลล์สืบพันธุ์รวมกัน ความถี่ของจีโนไทป์ในชั่วรุ่นต่อไปจะเป็นไปตามหลักการคูณ คือ

ความถี่ของจีโนไทป์ RR คือ $p^2 = (0.8)^2 = 0.64$
ความถี่ของจีโนไทป์ rr คือ $q^2 = (0.2)^2 = 0.04$
และความถี่ของจีโนไทป์ Rr คือ $2pq = 2\,(0.8)\,(0.2) = 0.32$

เมื่อรวมความถี่ของทุกจีโนไทป์จะมีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือ

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

ดังนั้น

$$(p + q)^2 = 1$$

สมการ $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ นี้ เรียกว่า **สมการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก** (Hardy-Weinberg equation) และประชากรที่มีความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่าประชากรที่อยู่ใน**สมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก** (Hardy-Weinberg equilibrium)

หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กนำมาใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนความถี่ของแอลลีลในประชากร เพื่อประมาณจำนวนของประชากรที่มีแอลลีลหรือจีโนไทป์ที่สนใจ เช่น ในการประมาณจำนวนคนที่เป็นพาหะของโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ ถ้าทราบจำนวนคนที่เป็นโรคนี้ซึ่งถูกควบคุมด้วยแอลลีลด้อย จะสามารถประมาณจำนวนคนที่เป็นพาหะของแอลลีลที่ทำให้เกิดโรคนี้ในประชากรได้

ตัวอย่างเช่น ในประชากรหนึ่งมีคนเป็นโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ จำนวน 9 คน จากประชากรทั้งหมด 10,000 คน ดังนั้นจะสามารถคาดคะเนความถี่ของแอลลีลที่ทำให้เกิดโรคและจำนวนผู้ที่เป็นพาหะของโรคในประชากรนี้ได้ โดยกำหนดให้จีโนไทป์ *aa* แสดงลักษณะของโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์

ดังนั้นความถี่ของจีโนไทป์ *aa* คือ $q^2 = \frac{9}{10,000}$

$$= 0.0009$$

$$q = \sqrt{0.0009}$$

$$= 0.03$$

แสดงว่าในกลุ่มประชากรนี้ มีความถี่ของแอลลีลที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์เท่ากับ 0.03 ดังนั้นจึงหาความถี่ของแอลลีล A ได้จาก

$$p + q = 1$$

$$p + 0.03 = 1$$

$$p = 1 - 0.03$$

$$= 0.97$$

จึงสามารถหาความถี่ของจีโนไทป์ *Aa* ได้จาก

$$2pq = 2\,(0.97)\,(0.03)$$

$$= 0.0582$$

ดังนั้นจึงสามารถคาดคะเนว่าในประชากร 10,000 คน มีผู้ที่เป็นพาหะของโรคโลหิตจางชนิดซิกเคิลเซลล์ (มีจีโนไทป์ *Aa*) จำนวน 582 คน



ตรวจสอบความเข้าใจ

 ถ้าประชากรนี้อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ความถี่ของแอลลีลด้อยในประชากรมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อไปในอีก 50 ชั่วรุ่น

 เพราะเหตุใดในธรรมชาติ ประชากรส่วนใหญ่จึงไม่อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก



กิจกรรม 7.1 การใช้หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก

จุดประสงค์

คำนวณหาความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์โดยใช้หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก

วิธีการทำกิจกรรม

ตอบคำถามจากโจทย์ปัญหาต่อไปนี้

1. ในพื้นที่แห่งหนึ่งมีประชากรจำนวน 400 คน ถ้าประชากรนี้มีความถี่ของแอลลีล A = 0.6 และแอลลีล a = 0.4 และอยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก จงหาจำนวนคนที่มีจีโนไทป์แบบต่าง ๆ
2. ลักษณะหมู่เลือด Rh เป็นลักษณะที่ควบคุมโดยยีน 1 โลคัส บนออโตโซมมี 2 แอลลีล มีการแสดงออกแบบข่มสมบูรณ์ ลักษณะเลือดหมู่ Rh^- เป็นลักษณะด้อย (*dd*) ในประชากรกลุ่มหนึ่งพบว่า มีประชากรเลือดหมู่ Rh^- อยู่ 16% เมื่อประชากรนี้อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก จงคำนวณหาความถี่ของแอลลีลในประชากร
3. ประชากรหนู ณ ทุ่งหญ้าแห่งหนึ่ง อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก พบว่าประชากรหนูร้อยละ 36 มีขนสีเทาซึ่งเป็นฮอมอไซกัสรีเซสสีฟ (*bb*) ส่วนหนูที่เหลือมีขนสีดำซึ่งเป็นลักษณะเด่น
   3.1 ความถี่ของแอลลีล *b* ในยีนพูลของประชากรเป็นเท่าใด
   3.2 จำนวนร้อยละของประชากรหนูที่มีจีโนไทป์แบบเฮเทอโรไซกัสเป็นเท่าใด
   3.3 ถ้าประชากรหนูมีจำนวน 500 ตัว จะมีหนูที่มีลักษณะขนสีดำที่มีจีโนไทป์แบบฮอมอไซกัสกี่ตัว

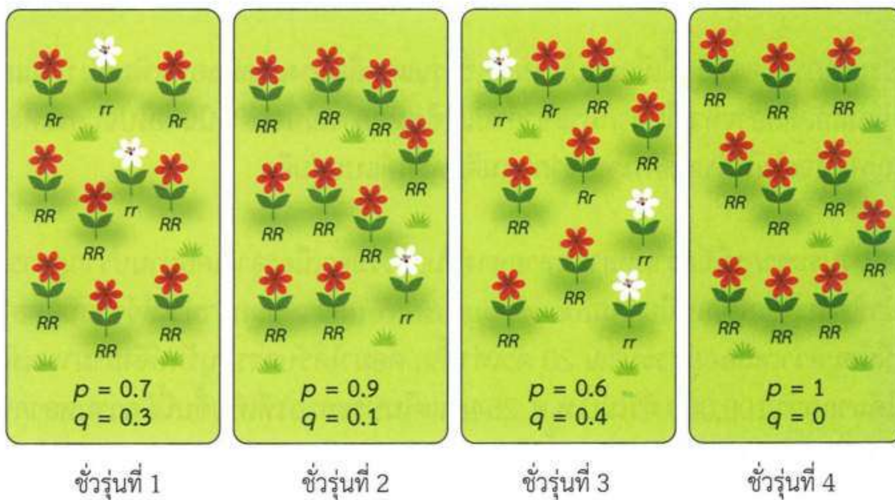
7.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล

ประชากรในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กนั้น ความถี่ของแอลลีลในประชากรแต่ละชั่วรุ่นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลหรือความถี่ของจีโนไทป์ในประชากรจะทำให้โครงสร้างทางพันธุกรรมของประชากรมีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ประชากรเกิดวิวัฒนาการขึ้น และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางพันธุกรรมของยีนพูลในประชากรนี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเกิดวิวัฒนาการในระดับสปีชีส์หรือในประชากรของสิ่งมีชีวิต มักจะปรากฏขึ้นทีละเล็กทีละน้อย และใช้เวลาไม่กี่ชั่วรุ่น เรียกว่า **วิวัฒนาการจุลภาค** (microevolution) ส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลายาวนานก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟีโนไทป์ในประชากรซึ่งมากพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ทำให้เกิดสปีชีส์ใหม่หรือเหนือกว่าระดับสปีชีส์ เรียกว่า **วิวัฒนาการมหภาค** (macroevolution)

ปัจจัยที่ทำให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรเปลี่ยนแปลงและเกิดวิวัฒนาการจุลภาค ได้แก่ **เจเนติกดริฟต์แบบสุ่ม** (random genetic drift) **การถ่ายเทยีน** (gene flow) **การผสมพันธุ์แบบไม่สุ่ม** (nonrandom mating) **มิวเทชัน** (mutation) และ**การคัดเลือกโดยธรรมชาติ** (natural selection) จะเห็นได้ว่าปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ทำให้ประชากรไม่อยู่ในเงื่อนไขของสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก **ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้ประชากรเกิดวิวัฒนาการได้อย่างไร**

1. เจเนติกดริฟต์แบบสุ่ม

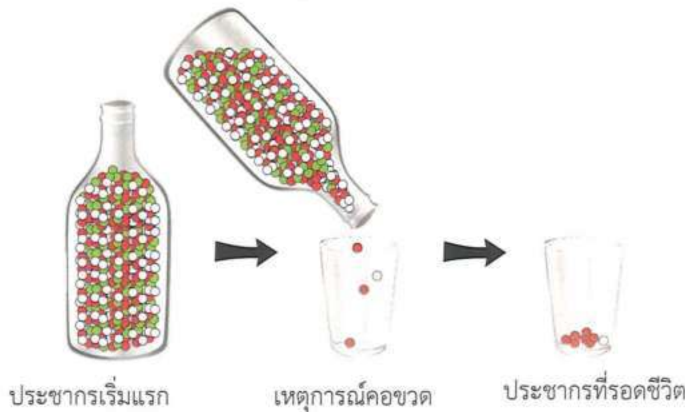
ขนาดของประชากรเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความถี่ของแอลลีล เนื่องจากถ้าประชากรมีขนาดเล็กเกินไป เหตุการณ์บางอย่างที่เกิดขึ้นแบบไม่เฉพาะเจาะจงอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลอย่างมากได้ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลที่เกิดขึ้นแบบไม่เฉพาะเจาะจงหรือเกิดขึ้นแบบสุ่มในประชากรที่มีขนาดเล็กนี้ ไม่ได้เกิดจากการคัดเลือกโดยธรรมชาติ และถ้าประชากรมีขนาดเล็กมาก แอลลีลที่มีความถี่ต่ำในประชากรอาจหายไปจากยีนพูลของประชากรได้ (รูป 7.16) การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลแบบสุ่มที่เกิดขึ้นในประชากรขนาดเล็กนี้ เรียกว่า เจเนติกดริฟต์แบบสุ่ม



รูป 7.16 เจเนติกดริฟต์แบบสุ่มในประชากรขนาดเล็กของไม้ดอก
p คือ ความถี่ของแอลลีล R (แอลลีล R ควบคุมลักษณะดอกสีแดง)
q คือ ความถี่ของแอลลีล r (แอลลีล r ควบคุมลักษณะดอกสีขาว)

? มีสาเหตุใดบ้างที่ทำให้ความถี่ของแอลลีลในแต่ละชั่วรุ่นของประชากรไม้ดอกในรูปมีการเปลี่ยนแปลง

ประชากรที่มีขนาดใหญ่ในธรรมชาติอาจประสบภัยพิบัติ เช่น แผ่นดินไหว อุทกภัย ความแห้งแล้ง ไฟป่า จนทำให้ประชากรมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็ว ประชากรที่รอดชีวิตซึ่งมีขนาดเล็กมากอาจมียีนพูลไม่เหมือนประชากรเดิม เจเนติกดริฟต์แบบสุ่มซึ่งเริ่มต้นจากประชากรขนาดใหญ่ถูกทำให้เล็กลงอย่างมาก เรียกว่า **ปรากฏการณ์คอขวด** (bottleneck effect) ดังรูป 7.17



รูป 7.17 ภาพจำลองปรากฏการณ์คอขวด

ในประชากรที่รอดชีวิตนี้เมื่อผ่านไปหลายชั่วรุ่นแอลลีลบางแอลลีลอาจเพิ่มขึ้น บางแอลลีลอาจลดลง และบางแอลลีลอาจหายไปจากประชากรนี้ได้ ซึ่งเหตุการณ์นี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งประชากรมีขนาดใหญ่พอที่จะไม่ได้รับผลกระทบจากเจเนติกดริฟต์แบบสุ่มอีก

ตัวอย่างประชากรที่มีความหลากหลายทางพันธุกรรมต่ำเนื่องจากเคยผ่านปรากฏการณ์คอขวด เช่น แมวน้ำช้างทางซีกโลกเหนือ *(Mirounga angustirostris)* เคยถูกล่าทำให้จำนวนลดลงจนเกือบสูญพันธุ์ (มีข้อมูลว่าเหลืออยู่ประมาณ 20 ตัวเท่านั้น) ต่อมาได้รับการอนุรักษ์จึงสามารถเพิ่มจำนวนประชากรได้มากกว่า 100,000 ตัวในปี พ.ศ. 2548 แต่ในประชากรที่เพิ่มขึ้นนี้มีความหลากหลายทางพันธุกรรมต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แมวน้ำช้างทางซีกโลกเหนือเคยมีประชากรขนาดเล็กมากจากการผ่านปรากฏการณ์คอขวด

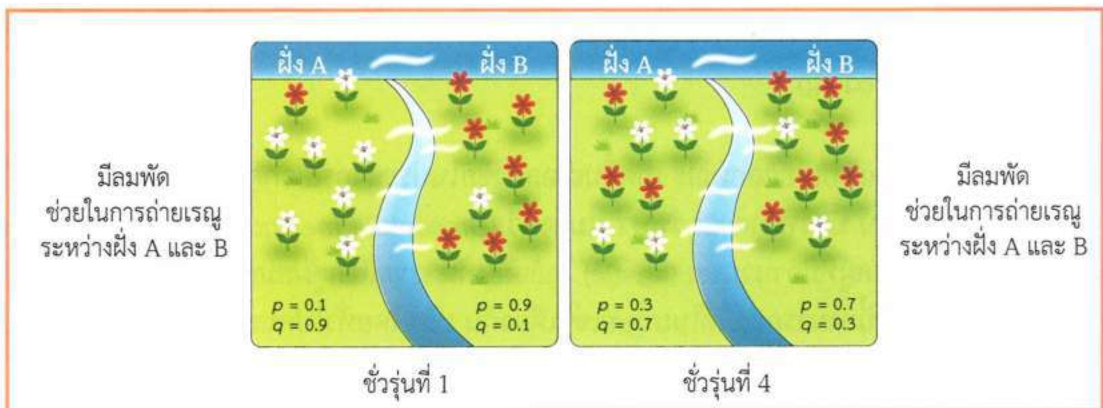
นอกจากนี้หากสมาชิกเพียงไม่กี่ตัวของประชากรขนาดใหญ่มีการย้ายถิ่นไปอยู่ในแหล่งที่อยู่ใหม่ ในกรณีนี้ถ้าประชากรที่อพยพไปมีขนาดเล็กมาก ยีนพูลของประชากรนี้จะมีโอกาสที่จะแตกต่างจากประชากรในตอนเริ่มแรกมากขึ้น ซึ่งประชากรที่อพยพมานี้จะเป็นประชากรเริ่มต้นที่จะเพิ่มจำนวนเป็นประชากรในแหล่งที่อยู่ใหม่นี้ ซึ่งความถี่ของแอลลีลในประชากรใหม่นี้จะแตกต่างจากประชากรในแหล่งที่อยู่เดิม

เจเนติกดริฟต์แบบสุ่มซึ่งเริ่มต้นจากการอพยพของสมาชิกในประชากรขนาดใหญ่ เรียกว่า **ปรากฏการณ์ผู้ก่อตั้ง** (founder effect)

ปรากฏการณ์ผู้ก่อตั้งอาจนำมาใช้อธิบายประชากรมนุษย์ที่มีความถี่ของโรคทางพันธุกรรมบางโรคสูงในประชากรที่แยกออกมาอยู่โดดเดี่ยว เช่น ชาวอังกฤษ 15 คน ที่อพยพไปตั้งรกรากอยู่บนหมู่เกาะเล็ก ๆ ในมหาสมุทรแอตแลนติก ระหว่างทวีปแอฟริกากับทวีปอเมริกาใต้ในปี พ.ศ. 2357 ในครั้งนั้นผู้อพยพคนหนึ่งเป็นพาหะของแอลลีลด้อยของโรคจอประสาทตาเสื่อม (retinitis pigmentosa) ปกติโรคนี้จะแสดงอาการในผู้ที่เป็นฮอมอไซกัสรีเซสสีฟ ต่อมาในช่วงประมาณปี พ.ศ. 2500 พบว่าในประชากร 240 คน ซึ่งเป็นลูกหลานของผู้อพยพดังกล่าว มีผู้เป็นโรคนี้ถึง 4 คน โดยมีความถี่ของแอลลีลก่อโรคในประชากรบนหมู่เกาะนี้มีมากกว่าในประชากรเดิมที่อังกฤษถึง 10 เท่า

2. การถ่ายเทยีน

จากการศึกษาความถี่ของแอลลีลในประชากรไม้ดอกที่อยู่ริมฝั่งแม่น้ำ พบว่าฝั่งด้าน A มีประชากรไม้ดอกสีขาวมากกว่าสีแดง โดยมีความถี่ของแอลลีล $r = 0.9$ (r ควบคุมลักษณะดอกสีขาว) และฝั่งด้าน B มีประชากรไม้ดอกสีแดงมากกว่าสีขาว มีความถี่ของแอลลีล $r = 0.1$ ดังรูป 7.19 (ชั่วรุ่นที่ 1) ต่อมามีลมพัดแรงเกิดขึ้นบริเวณนี้ ทำให้มีการถ่ายเรณูระหว่างประชากรไม้ดอกทั้ง 2 ฝั่ง เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าฝั่ง A มีประชากรไม้ดอกสีแดงเพิ่มมากขึ้น และมีไม้ดอกสีขาวลดลง โดยมีความถี่ของแอลลีล $r = 0.7$ และฝั่ง B มีประชากรไม้ดอกสีขาวเพิ่มมากขึ้นและมีประชากรไม้ดอกสีแดงลดลง โดยมีความถี่ของแอลลีล $r = 0.3$ ดังรูป 7.18 (ชั่วรุ่นที่ 4)



รูป 7.18 การถ่ายเทยีนระหว่างประชากรไม้ดอก

โดย p คือ ความถี่ของแอลลีล R (แอลลีล R ควบคุมลักษณะดอกสีแดง)

q คือ ความถี่ของแอลลีล r (แอลลีล r ควบคุมลักษณะดอกสีขาว)

จะเห็นว่าประชากรไม้ดอกทั้ง 2 ฝั่ง เมื่อมีโอกาสผสมพันธุ์กันทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายยีนหรือแอลลีลจากประชากรหนึ่งไปยังอีกประชากรหนึ่ง การเคลื่อนย้ายยีนหรือแอลลีลระหว่างประชากรในลักษณะนี้ เรียกว่า การถ่ายเทยีน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความถี่ของแอลลีลในแต่ละประชากรเปลี่ยนแปลงไปได้



ตรวจสอบความเข้าใจ

- ? จากตัวอย่างประชากรไม้ดอกทั้ง 2 กลุ่ม ความถี่ของแอลลีลในประชากรมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- ? การอพยพเข้าและออกของประชากร จะทำให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรมีการเปลี่ยนแปลงเสมอไปหรือไม่ เพราะเหตุใด

? ปัจจุบันคนไทยแต่งงานกับชาวต่างชาติมากขึ้น อาจทำให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เพราะเหตุใด

3. การผสมพันธุ์แบบไม่สุ่ม

ถ้าสมาชิกในประชากรมีการผสมพันธุ์แบบไม่สุ่ม ความถี่ของประชากรจะไม่คงที่ ประชากรจะไม่อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก และอาจเป็นสาเหตุให้เกิดวิวัฒนาการในประชากรขึ้นได้ การผสมพันธุ์แบบไม่สุ่มอาจเกิดได้จาก**การผสมพันธุ์แบบเลือกลักษณะ** (assortative mating) และ**การผสมพันธุ์ในเครือญาติ** (inbreeding)

การผสมพันธุ์แบบเลือกลักษณะ เกิดขึ้นเมื่อสมาชิกในประชากรเลือกคู่ผสมพันธุ์จากฟีโนไทป์ของเพศตรงข้าม เช่น นักวิทยาศาสตร์พบว่าแมลงหวี่ *(Drosophila melanogaster)* เพศเมียมักจะเลือกผสมพันธุ์กับเพศผู้ที่มีจำนวนขน (bristle) ใกล้เคียงกัน การเลือกคู่ผสมพันธุ์กับเพศตรงข้ามที่มีลักษณะใกล้เคียงกันนี้สามารถพบได้ในมนุษย์เช่นเดียวกัน เช่น โดยทั่วไปคนส่วนใหญ่มักแต่งงานกับคนเชื้อชาติเดียวกัน

ส่วนการผสมพันธุ์ในเครือญาติแม้ว่าความถี่ของแอลลีลในยีนพูลจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของจีโนไทป์ที่เป็นฮอมอไซกัสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในบางลักษณะอาจทำให้เกิดผลเสียต่อการอยู่รอดหรือการสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต

4. มิวเทชัน

มิวเทชันเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในระดับยีนและในระดับโครโมโซมในลักษณะต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เกิดขึ้นได้เสมอในภาวะปกติ และเกิดได้ทั้งในเซลล์ร่างกายและเซลล์สืบพันธุ์ การเกิดมิวเทชันเพียงอย่างเดียวไม่มีผลมากพอจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางพันธุกรรมของยีนพูลในประชากรขนาดใหญ่ภายในชั่วรุ่นเดียว แต่เป็นการสร้างแอลลีลใหม่มาสะสมไว้ในยีนพูลของประชากร ทำให้เกิดความหลากหลายทางพันธุกรรมของประชากร โดยธรรมชาติจะเป็นผู้คัดเลือกแอลลีลใหม่ที่เหมาะสมไว้ในประชากรและเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความถี่ของแอลลีลในประชากรเปลี่ยนแปลง

มิวเทชันเป็นการสร้างลักษณะทางพันธุกรรมขึ้นมาใหม่ในประชากร ซึ่งอาจเป็นลักษณะที่ดีหรือไม่ดีในประชากรนั้น ขณะที่การคัดเลือกโดยธรรมชาติไม่ได้สร้างลักษณะทางพันธุกรรมขึ้นมาใหม่ แต่จะคัดเลือกฟีโนไทป์ของประชากรที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่สิ่งมีชีวิตนั้นอาศัยอยู่

5. การคัดเลือกโดยธรรมชาติ

การคัดเลือกโดยธรรมชาติทำให้ความถี่ของแอลลีลในยีนพูลของประชากรเปลี่ยนแปลงและเกิดวิวัฒนาการขึ้นอย่างไร นักเรียนจะได้ศึกษาจากกิจกรรมต่อไปนี้



กิจกรรม 7.2 การคัดเลือกโดยธรรมชาติ

จุดประสงค์

สรุปการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลที่เกิดขึ้นจากการคัดเลือกโดยธรรมชาติ

วิธีการทำกิจกรรม

ในประเทศอังกฤษ พบผีเสื้อกลางคืนชนิด *Biston betularia* ซึ่งมีทั้งสีเทาและสีดำ ผีเสื้อชนิดนี้ชอบอาศัยอยู่ตามลำต้นของต้นไม้ นักชีววิทยาคนหนึ่งได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการคัดเลือกโดยธรรมชาติโดยจับผีเสื้อมาติดเครื่องหมายและปล่อยไปในเมือง 2 แห่งคือ เมือง A เป็นเมืองที่อากาศมีมลพิษน้อย ต้นไม้ยังคงมีไลเคนขึ้นอยู่ และเมือง B เป็นเมืองที่อากาศมีมลพิษมาก จนไลเคนไม่สามารถเจริญได้และเปลือกต้นไม้มีเขม่าสีดำเกาะอยู่ หลังจากปล่อยผีเสื้อไปได้ระยะเวลาหนึ่งแล้วจับผีเสื้อกลับมาและได้ข้อมูลดังตาราง

สถานที่ทดลอง		จำนวนผีเสื้อ (ตัว)	
		จำนวนที่ปล่อย	จำนวนที่จับกลับมา
เมือง A	ผีเสื้อสีเทา	500	67
	ผีเสื้อสีดำ	500	28
เมือง B	ผีเสื้อสีเทา	500	61
	ผีเสื้อสีดำ	500	154



ผีเสื้อกลางคืนเมือง A



ผีเสื้อกลางคืนเมือง B

จากข้อมูลข้างต้น ให้นักเรียนวิเคราะห์และตอบคำถามต่อไปนี้

? การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลในประชากรผีเสื้อในเมือง A และ เมือง B เป็นอย่างไร

? ธรรมชาติมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลที่ทำให้เกิดการคัดเลือกลักษณะในประชากรผีเสื้อสปีชีส์นี้อย่างไร

การคัดเลือกโดยธรรมชาติทำให้สมาชิกของประชากรที่มีลักษณะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมีลูกหลานได้มาก จึงมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ประชากรที่มีลักษณะไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจะมีลูกหลานน้อยกว่า จึงมีจำนวนลดลง ทำให้แอลลีลบางแอลลีลในประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและบางแอลลีลในประชากรมีจำนวนลดลง ความถี่ของแอลลีลในประชากรจึงเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สิ่งมีชีวิตมีวิวัฒนาการที่ช่วยให้อยู่รอดในสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น เช่น การที่ตั๊กแตนใบไม้มีรูปร่าง ลักษณะ และสีสันกลมกลืนกับสภาพแวดล้อม (รูป 7.19)



รูป 7.19 ตั๊กแตนใบไม้ที่มีลักษณะกลมกลืนกับสภาพแวดล้อม

? เพราะเหตุใดตั๊กแตนใบไม้จึงมีชีวิตรอดได้ดีในสภาพแวดล้อมนี้ และสิ่งที่เป็นตัวคัดเลือกในธรรมชาติคืออะไร

? ถ้าสภาพแวดล้อมที่ตั๊กแตนใบไม้อาศัยอยู่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โอกาสในการอยู่รอดของประชากรตั๊กแตนใบไม้จะยังคงเหมือนเดิมหรือไม่ เพราะเหตุใด



ตรวจสอบความเข้าใจ

? การแปรผันทางพันธุกรรม มิวเทชัน และการคัดเลือกโดยธรรมชาติทำให้เกิดวิวัฒนาการสิ่งมีชีวิตได้อย่างไร

ทุกปัจจัยที่กล่าวมาแล้วล้วนมีผลทำให้ความถี่ของแอลลีลที่เป็นองค์ประกอบทางพันธุกรรมในประชากรมีการเปลี่ยนแปลง แต่การคัดเลือกโดยธรรมชาติเท่านั้นที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เกิดลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม

7.5 กำเนิดสปีชีส์

วิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางพันธุกรรมของยีนพูลในประชากร และผลผลิตของวิวัฒนาการอาจทำให้เกิดสปีชีส์ใหม่ขึ้น **สปีชีส์มีความหมายอย่างไร**

7.5.1 ความหมายของสปีชีส์

การแบ่งกลุ่มสิ่งมีชีวิตออกเป็นสปีชีส์ต่าง ๆ นั้น นอกจากจะเปรียบเทียบจากลักษณะภายนอกแล้ว นักวิทยาศาสตร์ยังต้องใช้ความรู้ในด้านต่าง ๆ มาประกอบด้วย เช่น สรีรวิทยา ชีวเคมี และข้อมูลจากลำดับนิวคลีโอไทด์ เพื่อยืนยันการจัดกลุ่มสปีชีส์จากลักษณะภายนอกนั้น จากรูป 7.20 นกหัวขวานเขียว 2 ตัวนี้เป็นสปีชีส์เดียวกันหรือไม่



รูป 7.20 นก 2 ตัวที่มีลักษณะภายนอกคล้ายกัน
ก. นกหัวขวานเขียวคอเขียว ข. นกหัวขวานเขียวป่าไผ่

นก 2 ตัวนี้เป็นนกต่างสปีชีส์กัน แต่มีลักษณะภายนอกคล้ายกันมาก อาจไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นสปีชีส์เดียวกันหรือต่างสปีชีส์กันได้ ต้องศึกษาข้อมูลทางพันธุกรรมหรืออาจให้นกทั้ง 2 ตัวนี้ผสมพันธุ์กันแล้วดูว่าสามารถให้กำเนิดลูกได้หรือไม่ หากสามารถผสมพันธุ์กันและให้ลูกหลานสืบทอดต่อไปได้ นกทั้ง 2 ตัวนี้ก็จะเป็นสปีชีส์เดียวกัน เนื่องจากปัจจุบันความหมายของสปีชีส์ทางด้านชีววิทยา หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่สามารถผสมพันธุ์กันได้ในธรรมชาติ และให้กำเนิดลูกที่ไม่เป็นหมัน

นอกจากนี้ยังมีแนวคิดเกี่ยวกับความหมายของสปีชีส์แบบอื่น ๆ เช่น สปีชีส์ทางด้านสัณฐานวิทยา หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่มีโครงสร้างภายนอกเหมือนกันหรือการทำงานของโครงสร้างนั้นคล้ายกันสปีชีส์ทางด้านสายวิวัฒนาการ หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่มีวิวัฒนาการนานพอที่จะเกิดลักษณะใหม่ที่ทำให้แตกต่างจากสปีชีส์เดิมชัดเจนจากการศึกษาโดยอาศัยข้อมูลทางลำดับนิวคลีโอไทด์ แต่ความหมายของสปีชีส์ในแต่ละด้านไม่สามารถประยุกต์ใช้กับสิ่งมีชีวิตได้ทุกชนิด

? การศึกษาเพื่อจำแนกสปีชีส์ของซากดึกดำบรรพ์ควรใช้ความหมายของสปีชีส์ตามแนวคิดใด เพราะเหตุใด

ในบทเรียนนี้จะใช้ความหมายของสปีชีส์ทางด้านชีววิทยา โดยพิจารณาความสามารถในการผสมพันธุ์และให้กำเนิดลูกหลานที่ไม่เป็นหมัน **ในธรรมชาติมีสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์อยู่รวมกันจำนวนมาก สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีกลไกป้องกันการผสมพันธุ์ข้ามสปีชีส์ได้อย่างไร**

7.5.2 การแยกเหตุการสืบพันธุ์

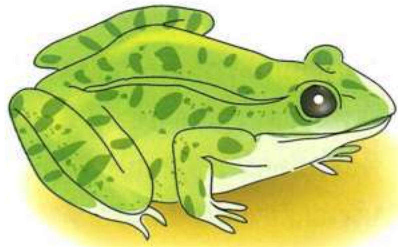
สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์มีการป้องกันการผสมพันธุ์ข้ามสปีชีส์ได้โดย**การแยกเหตุการสืบพันธุ์** (reproductive isolation) ซึ่งแบ่งออกได้ 2 ระดับ คือ การแยกเหตุการสืบพันธุ์ก่อนระยะไซโกตและการแยกเหตุการสืบพันธุ์หลังระยะไซโกต

1. การแยกเหตุการสืบพันธุ์ก่อนระยะไซโกต

ปัจจัยที่ป้องกันไม่ให้เซลล์สืบพันธุ์จากสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์มาปฏิสนธิกัน ทำให้ไม่เกิดไซโกต ได้แก่

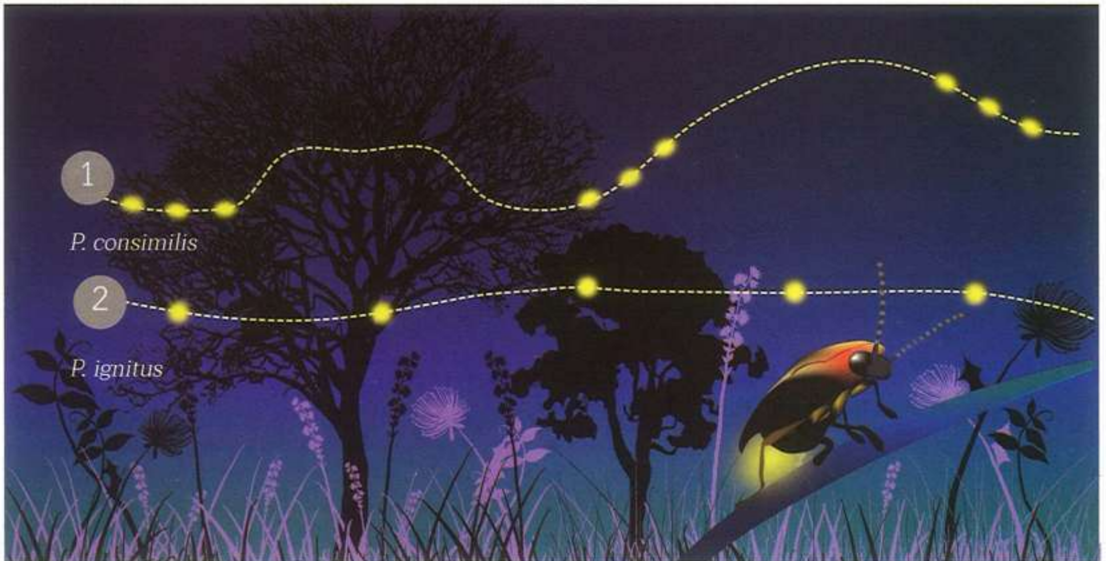
1.1 **แหล่งที่อยู่** สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์ที่อาศัยในแหล่งที่อยู่ต่างกัน เช่น กบป่าอาศัยอยู่ในแอ่งน้ำซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดขนาดเล็ก ส่วนกบบูลฟรอก (bullfrog) อาศัยอยู่ในหนองน้ำหรือบึงขนาดใหญ่ที่มีน้ำตลอดปี กบทั้ง 2 สปีชีส์นี้มีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกันมาก แต่อาศัยอยู่และผสมพันธุ์ในแหล่งน้ำที่แตกต่างกันทำให้ไม่มีโอกาสได้จับคู่ผสมพันธุ์กัน ดังรูป 7.21


ก.


ข.

รูป 7.21 กบต่างสปีชีส์ที่อาศัยในแหล่งที่อยู่ต่างกัน
ก. กบป่าอาศัยในแอ่งน้ำขนาดเล็ก ข. กบบูลฟรอกอาศัยในบึงขนาดใหญ่

1.2 พฤติกรรม สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์มีพฤติกรรมต่างกัน พฤติกรรมต่าง ๆ นี้จะมีผลต่อเพศตรงข้ามในสปีชีส์เดียวกันเท่านั้น เช่น การใช้ฟีโรโมนของแมลง พฤติกรรมในการเกี้ยวพาราสีของนก ลักษณะการสร้างรังของนก จังหวะการเปล่งแสงเพื่อดึงดูดเพศเมียของหิ่งห้อยแต่ละสปีชีส์ (รูป 7.22) ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกันเท่านั้นที่จะจับคู่ผสมพันธุ์กัน



รูป 7.22 จังหวะการเปล่งแสงของหิ่งห้อยเพื่อดึงดูดเพศเมียที่แตกต่างกันของหิ่งห้อย 2 สปีชีส์ในสกุล *Photinus*

1.3 ช่วงเวลาในการผสมพันธุ์ สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์มีช่วงเวลาในการผสมพันธุ์ต่างกัน อาจเป็นช่วงเวลาของวันหรือฤดูกาล เช่น แมลงหวี่ *Drosophila pseudoobscura* มีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการผสมพันธุ์ในเวลาบ่าย แต่แมลงหวี่ *Drosophila persimilis* จะมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในเวลาเช้า ทำให้แมลงหวี่ทั้ง 2 สปีชีส์นี้ไม่มีโอกาสผสมพันธุ์กันได้ หรือพืชสไปเดอร์เวิร์ธ 2 สปีชีส์ (*Tradescantia canaliculata* และ *T. subaspera*) ขึ้นอยู่ในบริเวณเดียวกัน แต่ออกดอกต่างฤดูกาลกัน ทำให้พืชทั้ง 2 สปีชีส์นี้ไม่มีโอกาสผสมพันธุ์กันได้

1.4 โครงสร้างของอวัยวะสืบพันธุ์ สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์จะมีขนาดและรูปร่างของอวัยวะสืบพันธุ์แตกต่างกันทำให้ไม่สามารถผสมพันธุ์กันได้ เช่น โครงสร้างของดอกไม้บางชนิดมีลักษณะสอดคล้องกับลักษณะของแมลงหรือสัตว์บางชนิด ทำให้แมลงหรือสัตว์นั้น ๆ ถ่ายเรณูเฉพาะพืชในสปีชีส์เดียวกันเท่านั้น ดังรูป 7.23



รูป 7.23 โครงสร้างของดอกที่แตกต่างกันของพืช 2 สปีชีส์ ในสกุล *Mimulus*
ก. โครงสร้างดอกที่เหมาะสมกับผึ้งตัวเล็ก ข. โครงสร้างดอกที่เหมาะสมกับนกฮัมมิ่ง

1.5 **เซลล์สืบพันธุ์** เมื่อเซลล์สืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันมีโอกาสมาพบกันแต่ไม่สามารถปฏิสนธิกันได้ อาจเป็นเพราะอสุจิไม่สามารถมีชีวิตอยู่ภายในสภาพแวดล้อมของอวัยวะสืบพันธุ์เพศเมียหรืออสุจิไม่สามารถสลายสารเคมีที่หุ้มเซลล์ไข่ของสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์ได้

2. การแยกเหตุการสืบพันธุ์หลังระยะไซโกต

ในกรณีที่เซลล์สืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์สามารถปฏิสนธิกันได้ไซโกตที่เป็นลูกผสม แต่ลูกผสมที่เกิดขึ้นไม่สามารถให้ลูกหลานสืบต่อไปได้ ซึ่งมีสาเหตุดังนี้

2.1 **ลูกผสมตายก่อนถึงวัยเจริญพันธุ์** กบ (*Rana* spp.) ต่างสปีชีส์กันเมื่อผสมพันธุ์กันแล้วจะมีการตายของตัวอ่อนในระยะต่าง ๆ กัน และไม่สามารถเจริญเติบโตเป็นตัวเต็มวัยได้

2.2 **ลูกผสมเป็นหมัน** ม้ากับลาเมื่อผสมพันธุ์กันแล้วจะได้ล่อซึ่งเป็นหมันไม่สามารถให้กำเนิดลูกต่อไปได้ ดังรูป 7.24



รูป 7.24 สิ่งมีชีวิต 2 สปีชีส์และลูกผสมที่เป็นหมัน
ก. ม้า ข. ลา ค. ล่อ

? ม้ามีโครโมโซมจำนวน 64 โครโมโซม ส่วนลามีจำนวนโครโมโซม 62 โครโมโซม ล่อควรมีจำนวนโครโมโซมเท่าใด และเพราะเหตุใดล่อจึงเป็นหมัน

? นอกจากล่อแล้วมีลูกผสมที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์ชนิดใดอีกบ้าง

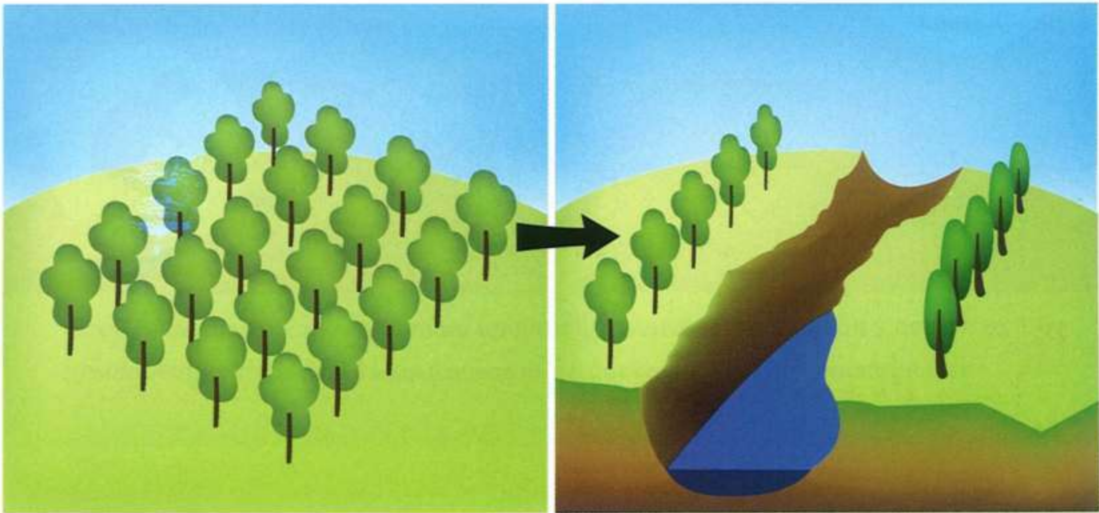
2.3 **ลูกผสมล้มเหลว** ทานตะวัน (*Layia* spp.) 2 สปีชีส์เมื่อผสมกัน ลูกผสมที่เกิดขึ้นสามารถเจริญเติบโตและให้ลูกผสมในรุ่น F_1 ได้ แต่ลูกในรุ่น F_2 จะอ่อนแอและเป็นหมัน

7.5.3 กำเนิดสปีชีส์ใหม่

สปีชีส์ใหม่ จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการถ่ายเทยีนระหว่างประชากรในรุ่นบรรพบุรุษ ทำให้ประชากรทั้งสองมีโครงสร้างทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันและมีวิวัฒนาการเกิดเป็นสปีชีส์ใหม่ขึ้นได้ โดยกระบวนการเกิดสปีชีส์ใหม่อาจเกิดได้ 2 แนวทาง คือ

1. กำเนิดสปีชีส์แบบแอลโลพาทริก

กลไกการเกิดสปีชีส์ใหม่ลักษณะนี้ เกิดจากประชากรดั้งเดิมในรุ่นบรรพบุรุษที่เคยอาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกัน ต่อมาเกิดการแบ่งแยกพื้นที่นั้นจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิศาสตร์ เช่น การเกิดภูเขา แม่น้ำ หรือทะเลมาขวางกั้น ทำให้ประชากรที่เคยอาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกันถูกแบ่งแยกออกจากกันเป็นประชากรย่อย ๆ และไม่มีการถ่ายเทยีนระหว่างกัน ประกอบกับประชากรย่อยในแต่ละแห่งต่างก็มีวิวัฒนาการไปให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของตนเอง ทำให้มีความแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ ในที่สุดแม้ว่าประชากรย่อยเหล่านั้นจะมีโอกาสกลับมาอยู่ร่วมกันอีกแต่ไม่สามารถผสมพันธุ์กันได้จัดว่าเป็นสปีชีส์ที่แตกต่างกัน นั่นคือเกิดเป็นสปีชีส์ใหม่จากการแบ่งแยกทางภูมิศาสตร์หรือ **กำเนิดสปีชีส์แบบแอลโลพาทริก** (allopatric speciation) ดังรูป 7.25



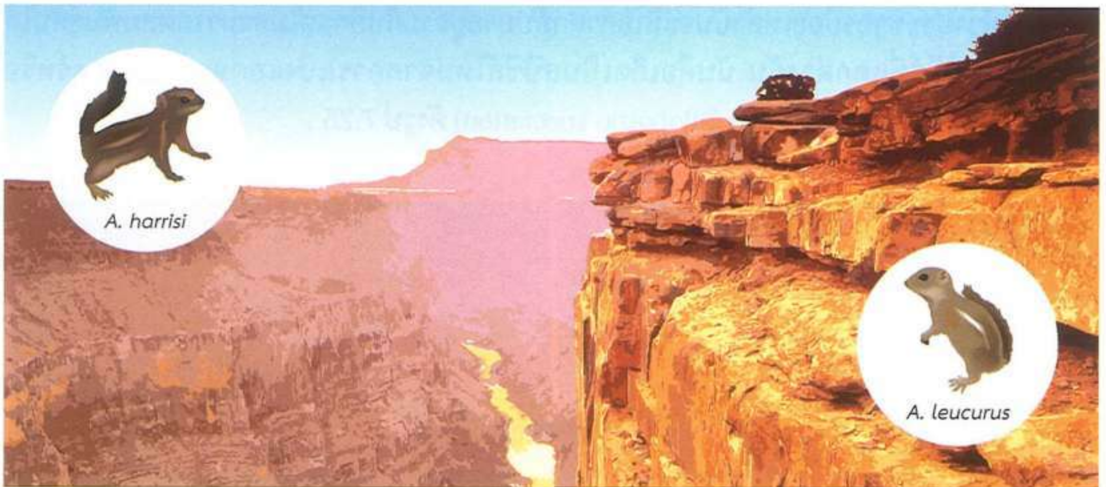
รูป 7.25 กำเนิดสปีชีส์แบบแอลโลพาทริก



ตรวจสอบความเข้าใจ

 เพราะเหตุใดประชากรของสิ่งมีชีวิตที่แยกออกจากกันในลักษณะนี้ เมื่อกลับมาอยู่ร่วมกันอีกครั้งจึงไม่สามารถผสมพันธุ์กันได้อีก

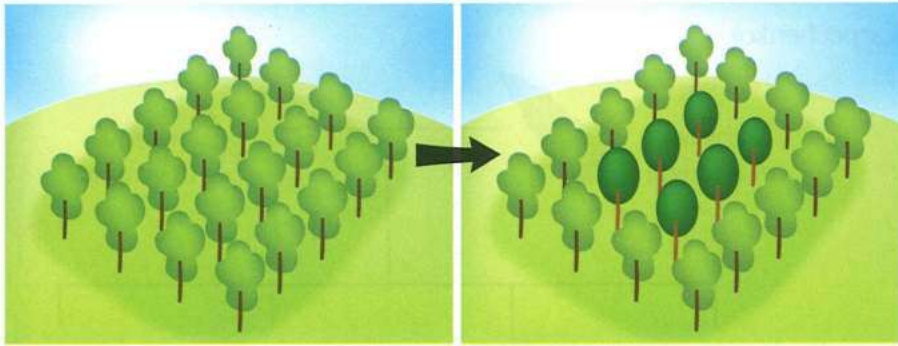
การเกิดสปีชีส์ใหม่ในลักษณะแบบนี้เป็นกระบวนการค่อยเป็นค่อยไป อาจใช้เวลานานนับเป็นพัน ๆ หรือเป็นล้าน ๆ ชั่วรุ่น เช่น กระรอก 2 สปีชีส์ในรัฐอริโซนา ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แต่พบว่าอาศัยอยู่บริเวณขอบเหวแต่ละด้านของแกรนด์แคนยอนซึ่งเป็นหุบผาที่ลึกและกว้างดังรูป 7.26 นักชีววิทยาเชื่อกันว่ากระรอก 2 สปีชีส์นี้เคยเป็นสปีชีส์เดียวกันมาก่อนที่จะเกิดการแยกของแผ่นดินขึ้น



รูป 7.26 กระรอก 2 สปีชีส์ที่อาศัยอยู่บริเวณแกรนด์แคนยอน โดยกระรอก *Ammospermophilus harrisi* อาศัยอยู่ขอบเหวด้านทิศใต้และกระรอก *Ammospermophilus leucurus* อาศัยอยู่ขอบเหวด้านทิศเหนือ

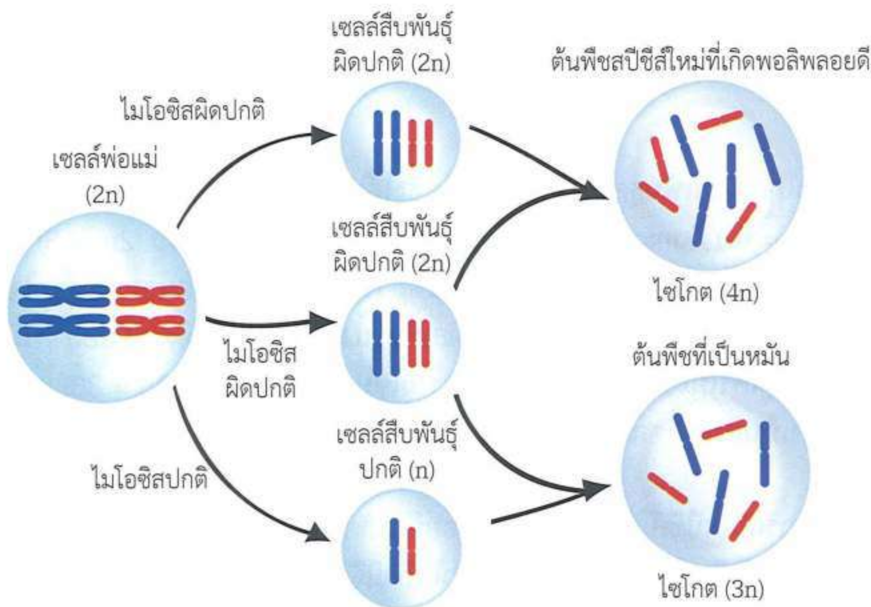
2. กำเนิดสปีชีส์แบบซิมพาทริก

การเกิดสปีชีส์ใหม่ในเขตภูมิศาสตร์เดียวกันหรือ**กำเนิดสปีชีส์แบบซิมพาทริก** (sympatric speciation) เป็นการเกิดสปีชีส์ใหม่ในพื้นที่เดียวกันกับบรรพบุรุษ ดังรูป 7.27 โดยมีกลไกมาป้องกันไม่ให้ประชากรกลุ่มย่อยมาผสมพันธุ์กับประชากรเดิมได้ แม้ว่าจะอยู่ในพื้นที่เดียวกันก็ตาม เช่น การเกิดพอลิพลอยดีของพืช การกินอาหารต่างชนิดกัน จนในที่สุดเกิดเป็นสปีชีส์ใหม่


รูป 7.27 กำเนิดสปีชีส์แบบซิมพาทริก

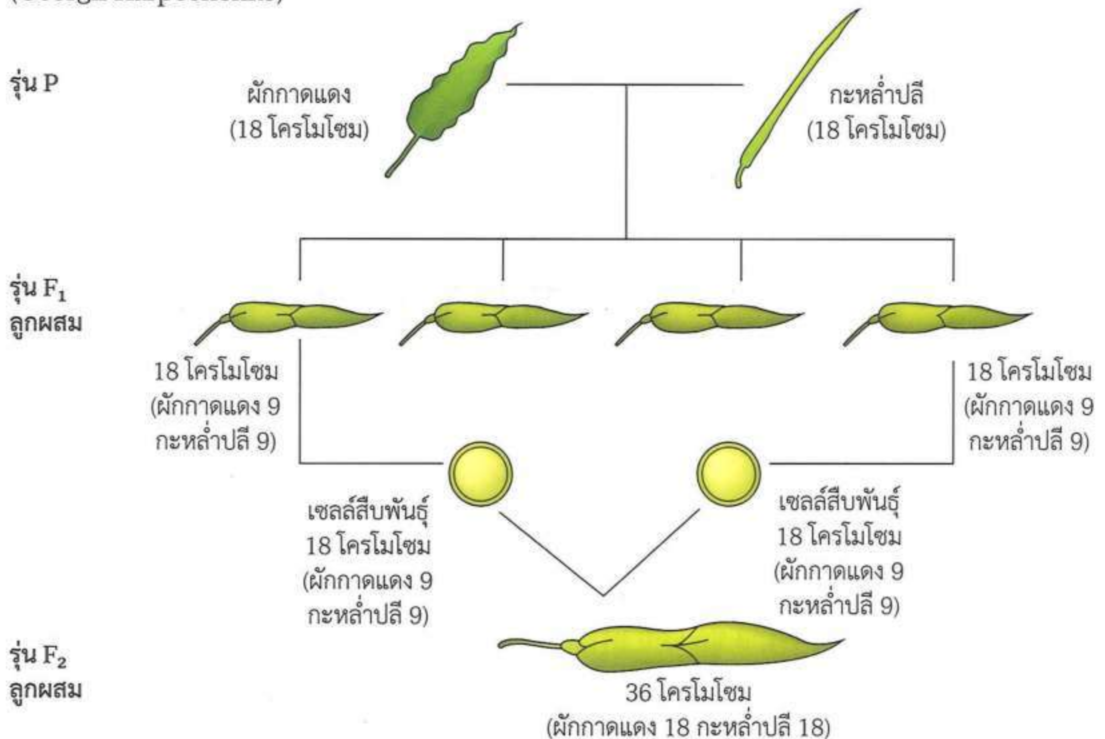
? กลไกใดที่ทำให้สมาชิกของประชากรเดียวกันและอาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกัน ไม่สามารถเกิดการถ่ายเทยีนระหว่างกันได้

พอลิพลอยดี เกิดจากความผิดปกติของกระบวนการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส ทำให้เซลล์สืบพันธุ์มีจำนวนโครโมโซม 2 ชุด (2n) เมื่อเซลล์สืบพันธุ์นี้เกิดการปฏิสนธิจะได้ไซโกตที่มีจำนวนโครโมโซมมากกว่า 2 ชุด เช่น มีโครโมโซม 3 ชุด (3n) หรือมีโครโมโซม 4 ชุด (4n) เป็นต้น การเกิดพอลิพลอยดีอาจเกิดจากสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกัน ดังรูป 7.28 หรือสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันดังรูป 7.29



รูป 7.28 การเกิดพอลิพลอยดีในสิ่งมีชีวิตสปีชีส์เดียวกัน

ตัวอย่างการเกิดพอลิพลอยดีของสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กัน คือ การทดลองของจอร์จิ คาร์ปิเชงโก (Georgii Karpechenko)



รูป 7.29 การเกิดพอลิพลอยดีในสิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กัน

คาร์ปิเชงโกเป็นนักพันธุศาสตร์ชาวรัสเซียซึ่งได้ผสมพันธุ์ผักกาดแดงซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 18 โครโมโซม (2n=18) กับกะหล่ำปลีซึ่งมีจำนวนโครโมโซม 18 โครโมโซม (2n =18) เท่ากัน พบว่าลูกผสมที่เกิดขึ้นในรุ่น F_1 มีขนาดใหญ่แข็งแรงแต่ส่วนใหญ่ไม่สามารถผสมพันธุ์ต่อไปได้ ลูกผสมในรุ่น F_1 บางต้นสามารถผสมพันธุ์กัน และได้ลูกผสมในรุ่น F_2 ซึ่งมีโอกาสเกิดได้น้อยมาก เมื่อนำลูกผสมในรุ่น F_2 มาตรวจดูโครโมโซม พบว่ามีจำนวนโครโมโซม 36 โครโมโซม (2n = 36) และไม่เป็นหมัน ดังนั้นรุ่น F_2 นี้จึงเป็นสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่ที่เกิดจากพอลิพลอยดี

ถึงแม้ว่าการเกิดสปีชีส์ใหม่แบบพอลิพลอยดีในสัตว์จะพบได้น้อยกว่าในพืชแต่ก็สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามยังมีกลไกอื่นอีกที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตเกิดสปีชีส์ใหม่ แม้ว่าจะยังคงอาศัยอยู่ในพื้นที่เดียวกันกับบรรพบุรุษ เช่น การเปลี่ยนแปลงยีนเพียงไม่กี่ยีนในแตนซึ่งเป็นแมลงช่วยในการผสมเกสรของพืชพวกมะเดื่อ ทำให้แตนที่มียีนเปลี่ยนแปลงเลือกไปอาศัยอยู่ในต้นมะเดื่อสปีชีส์ใหม่

และเนื่องจากแตนจะวางไข่ภายในผลมะเดื่อ เมื่อแตนเพศผู้ฟักออกจากไข่จะผสมกับแตนเพศเมียที่อยู่ภายในผลมะเดื่อผลเดียวกันเท่านั้น ทำให้แตนที่มียีนเปลี่ยนแปลงไม่มีโอกาสได้พบและผสมกับแตนประชากรเดิม แต่จะได้พบและผสมกับแตนที่มียีนเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน จนกระทั่งเกิดเป็นแตน 2 สปีชีส์ ที่อาศัยอยู่ในบริเวณเดียวกันในที่สุด

? ปัจจัยใดบ้างที่ทำให้เกิดแตนสปีชีส์ใหม่ขึ้นในบริเวณเดียวกัน



กิจกรรมเสนอแนะ : การปรับปรุงพันธุ์พืชแบบพอลิพลอยดี

จุดประสงค์

1. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และสรุปการใช้เทคโนโลยีทางการเกษตรในการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบพอลิพลอยดี
2. นำเสนอข้อมูลในชั้นเรียนหรือจัดทำเป็นป้ายนิเทศ

วิธีการทำกิจกรรม

ให้นักเรียนสืบค้นข้อมูลการใช้เทคโนโลยีทางการเกษตรในการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบพอลิพลอยดี ในประเด็นต่อไปนี้

1. ตัวอย่างพืช
2. ขั้นตอนการทำพอลิพลอยดี
3. ประโยชน์

จัดทำรายงานแล้วนำเสนอในชั้นเรียน

นับตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน ความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตเกิดจากกระบวนการวิวัฒนาการที่ค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางพันธุกรรมของประชากรทีละน้อยเป็นเวลาหลายชั่วรุ่นผ่านกระบวนการคัดเลือกโดยธรรมชาติ ซึ่งเป็นการคัดเลือกลักษณะของสิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและเกิดเป็นสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่ขึ้น กลไกเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ทำให้เกิดสิ่งมีชีวิตหลายสปีชีส์ เป็นความหลากหลายทางชีวภาพที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ



สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

1. สิ่งมีชีวิตในปัจจุบันเป็นลูกหลานที่มีลักษณะแตกต่างจากบรรพบุรุษในอดีต โดยผ่านการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมทีละเล็กทีละน้อย มีการสะสมลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในขณะนั้น ๆ เป็นเวลานานหลายชั่วรุ่น การเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เรียกว่าวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต

2. หลักฐานที่บ่งบอกว่าสิ่งมีชีวิตมีวิวัฒนาการศึกษาได้จาก ซากดึกดำบรรพ์ กายวิภาคเปรียบเทียบ วิทยาเอ็มบริโอ ชีววิทยาโมเลกุล และการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ เป็นต้น

3. แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตที่สำคัญ ได้แก่ แนวคิดของชอง ลามาร์กและชาลส์ ดาร์วิน โดยลามาร์กเสนอแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการโดยอาศัยกฎการใช้และไม่ใช้และกฎการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่ ส่วนดาร์วินเสนอแนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ

4. พันธุศาสตร์ประชากรเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์ในประชากรเพื่ออธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต โดยประชากรที่อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กจะมีความถี่ของแอลลีลและความถี่ของจีโนไทป์คงที่

5. ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลในประชากร ได้แก่ เจเนติกดริฟต์แบบสุ่ม การถ่ายเทยีน การผสมพันธุ์แบบไม่สุ่ม มิวเทชัน และการคัดเลือกโดยธรรมชาติ โดยปัจจัยดังกล่าวทำให้ยีนพูลในประชากรเปลี่ยนแปลงหรือเกิดวิวัฒนาการขึ้นและอาจนำไปสู่การเกิดสิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่

6. แนวคิดเกี่ยวกับความหมายของสปีชีส์มีหลายด้าน นิยมใช้ความหมายของสปีชีส์ทางด้านชีววิทยา การจัดสปีชีส์โดยอาศัยความหมายของสปีชีส์ในด้านใดด้านหนึ่งนั้นอาจไม่สามารถใช้ได้ในทุกสถานการณ์หรือไม่สามารถใช้กับสิ่งมีชีวิตได้ทุกชนิด

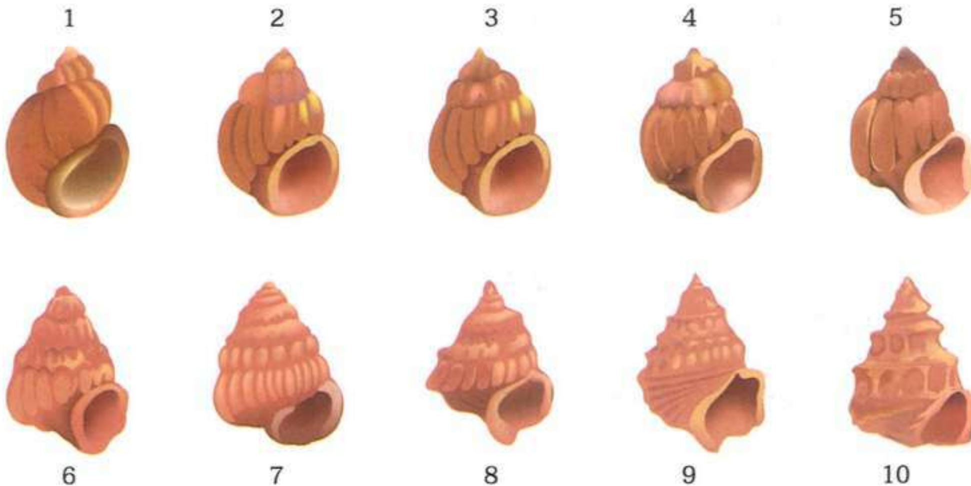
7. สิ่งมีชีวิตต่างสปีชีส์กันจะมีกลไกในการป้องกันการผสมพันธุ์ต่างสปีชีส์ สิ่งมีชีวิตสปีชีส์ใหม่เกิดขึ้นได้ 2 แนวทาง คือ กำเนิดสปีชีส์แบบแอลโลพาทริกและกำเนิดสปีชีส์แบบซิมพาทริก



แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

1. จงศึกษาภาพและข้อความข้างล่างนี้ แล้วตอบคำถาม

ภาพข้างล่างนี้เป็นซากดึกดำบรรพ์ของหอยโข่ง พบว่าซากดึกดำบรรพ์หอยหมายเลข 1 มีอายุมากที่สุด คือ 10 ล้านปีมาแล้ว และซากดึกดำบรรพ์หอยที่มีอายุน้อยที่สุด คือ หอยหมายเลข 10 ซึ่งมีอายุประมาณ 3 ล้านปีมาแล้ว



จงตอบคำถามต่อไปนี้

1.1 หอยเหล่านี้มีความเหมือนกันหรือแตกต่างกันอย่างไร

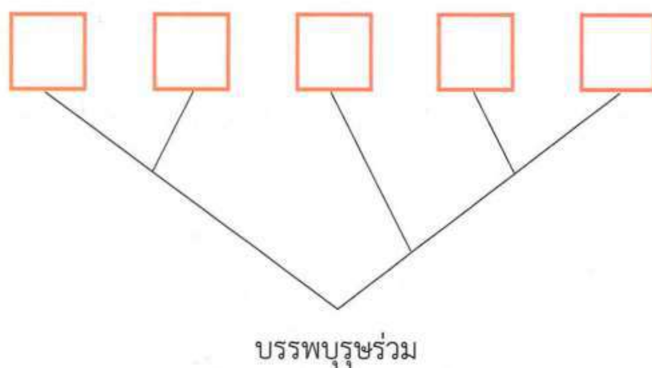
1.2 จากข้อมูลภาพข้างบนนี้แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการอย่างไร

1.3 ถ้าซากดึกดำบรรพ์ในตัวอย่างหมายเลข 3 4 5 และ 6 ขาดหายไป จากซากดึกดำบรรพ์ที่เหลือนักเรียนจะสรุปว่าอย่างไร

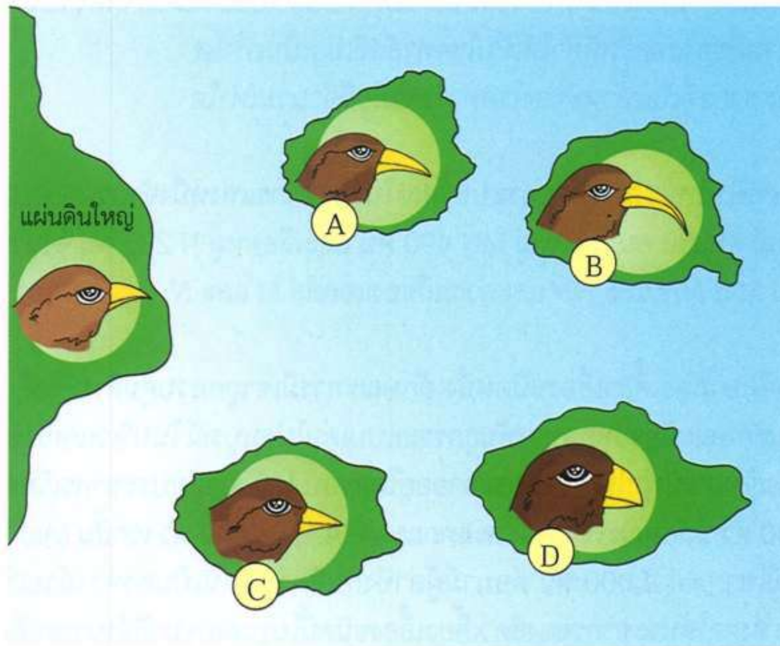
2. จากลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *M* ในหอย 5 สปีชีส์มีดังนี้

สปีชีส์	ลำดับนิวคลีโอไทด์
1	...TACTGGTTTA AGTTTGTTAA TTCGTGCTGA GTTAGGGCAA CCTGGTGCTT TATTAGGTGA...
2	...GGTCAACAAA TCATAAAGAC ATCGGGACGT TGTATATTTT ATTTGGAATA TGATCAGGGT...
3	...GGTCAACAAA TCATAAAGAC ATTGGAACAC TATACATTTT ATTTGGTATA TGATCCGGTC...
4	...TACAGCTTTA AGTTTATTAA TTCGAGCTGA ATTAGGGCAA CCTGGAGCAC TGCTGGGTGA...
5	...GGTCAACAAA TCATAAAGAT ATCGGGACAT TGTAGATTCT ATTTGGAATA TGATCGGGAC...

จงเขียนตัวเลขสปีชีส์ของหอยลงในช่องว่างตามความใกล้ชิดกันทางสายวิวัฒนาการ และอธิบายหลักการในการเรียงลำดับวิวัฒนาการของหอย 5 สปีชีส์นี้



3. พิจารณาแผนภาพแสดงลักษณะของจะงอยปากของนกชนิดหนึ่งที่แผ่นดินใหญ่ (mainland) และที่เกาะขนาดเล็ก 4 เกาะ (เกาะ A-D) ในแผนภาพต่อไปนี้



3.1 ให้ลากเส้นลงในแผนภาพเพื่อแสดงเส้นทางการเกิดวิวัฒนาการจะงอยปากของนกจากแผ่นดินใหญ่ไปยังเกาะต่าง ๆ พร้อมทั้งอธิบายเหตุผลประกอบ

3.2 จงจับคู่อาหารกับลักษณะจะงอยปากของนกชนิดนี้ที่อาศัยอยู่บนเกาะ A-D ให้มีความสัมพันธ์กัน


ก.


ข.


ค.


ง.

4. ในประชากรหนึ่ง ถ้าพบว่ามีสัดส่วนของผู้ที่เป็นโรคทาลัสซีเมีย ซึ่งถูกควบคุมด้วยแอลลีลด้อยบนออโตโซม (*aa*) เท่ากับ 10 ใน 25,000 คน กำหนดให้ประชากรนี้อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก และมีขนาดของประชากรเท่ากับ 500,000 คน อยากทราบว่า
   4.1 ความถี่ของแอลลีลที่ทำให้เป็นโรคทาลัสซีเมียเป็นเท่าใด
   4.2 ประชากรที่เป็นพาหะของโรคทาลัสซีเมียมีจำนวนเท่าใด

5. การศึกษาฟีโนไทป์ของหมู่เลือดระบบ MN ในประชากรแห่งหนึ่งจำนวน 1,000 คน พบว่ามีเลือดหมู่ M 280 คน เลือดหมู่ MN 490 คน และเลือดหมู่ N 230 คน จงหาความถี่ของจีโนไทป์ *MM MN* และ *NN* และความถี่ของแอลลีล *M* และ *N*

6. จากการศึกษาสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดหนึ่ง ลักษณะการมีเขาถูกควบคุมด้วยยีนตำแหน่งเดียว และเป็นลักษณะที่ถ่ายทอดทางพันธุกรรมแบบเด่นไม่สมบูรณ์ ในบริเวณหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นทุ่งหญ้าและมีพุ่มไม้เตี้ย ๆ กระจายอยู่โดยรอบ โดยในกลุ่มประชากรเริ่มต้นมีจำนวน 100,000 ตัว มีลักษณะเขายาวและแตกแขนง (*AA*) 64,000 ตัว เขาสั้น (*Aa*) 32,000 ตัว และไม่มีเขา (*aa*) 4,000 ตัว ต่อมามีผู้ล่าซึ่งกินสัตว์ชนิดนี้เป็นอาหารย้ายเข้าสู่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ประชากรของสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดนี้ในรุ่นต่อ ๆ มามีจำนวนเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อผ่านไป 10 ชั่วรุ่น พบว่ามีลักษณะเขายาวและแตกแขนง 200 ตัว เขาสั้น 1,200 ตัว และไม่มีเขา 600 ตัว
   6.1 ประชากรของสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดนี้ในกลุ่มเริ่มต้น มีความถี่ของแอลลีล *A* และ *a* และความถี่ของจีโนไทป์แต่ละแบบ อย่างละเท่าใด
   6.2 ประชากรของสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดนี้ที่เหลือเมื่อผ่านไป 10 ชั่วรุ่น มีความถี่ของแอลลีล *A* และ *a* และความถี่ของจีโนไทป์แต่ละแบบ อย่างละเท่าใด
   6.3 ประชากรของสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดนี้มีการเกิดวิวัฒนาการขึ้นหรือไม่ พิจารณาจากข้อมูลใด
   6.4 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับความถี่ของแอลลีลในกลุ่มประชากรของสัตว์เคี้ยวเอื้องชนิดนี้ในบริเวณดังกล่าวโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่ทำให้เกิดวิวัฒนาการจุลภาคได้อย่างไร

7. Ellis-Van Creveld syndrome เป็นภาวะผิดปกติทางพันธุกรรมที่เกิดจากแอลลีลด้อยบนโครโมโซมคู่ที่ 4 ของมนุษย์ มีลักษณะนิ้วเกิน แคระ แขนขาสั้น มีฟันผิดปกติแต่กำเนิด มีโครงหน้าผิดรูป และเป็นโรคหัวใจ พบผู้เป็นโรคประมาณ 1 คนต่อประชากร 60,000 คน แต่ในกลุ่ม Old Order Amish ในประเทศสหรัฐอเมริกาพบความถี่ของโรคนี้สูงถึงประมาณ 1 ใน 2,000 คน บรรพบุรุษของกลุ่ม Amish ย้ายมาจากทวีปยุโรปและเริ่มมาตั้งถิ่นฐานในศตวรรษที่ 18 โดยประชากรเริ่มต้น 1 ใน 30 คนเป็นโรคดังกล่าว กลุ่ม Amish มีความเคร่งด้านศาสนาและมีการแต่งงานภายในกลุ่มเท่านั้น
   7.1 ความถี่ของแอลลีลที่ทำให้เกิดโรค Ellis-Van Creveld syndrome ในกลุ่ม Old Order Amish อยู่ในสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กหรือไม่ เพราะเหตุใด
   7.2 สามารถใช้ความรู้เกี่ยวกับพันธุศาสตร์ประชากรอธิบายถึงความถี่ของผู้เป็นโรค Ellis-Van Creveld syndrome ในกลุ่ม Amish นี้ได้อย่างไร
   7.3 ตามประเพณีของชาว Amish เมื่อมีอายุ 16 ปี จะออกจากกลุ่มไปใช้ชีวิตภายนอกได้ก่อนที่จะตัดสินใจว่าจะเข้าร่วมศาสนาและกลับมาอยู่ในกลุ่มหรือไม่เมื่อบุคคลมีอายุ 18-21 ปี และสามารถแต่งงานมีครอบครัวได้ ผู้ที่เลือกไม่เข้าร่วมศาสนาจะต้องย้ายออกจากกลุ่มและไม่สามารถแต่งงานกับบุคคลใดในกลุ่ม Amish ได้ แต่พบว่าลูกหลานชาว Amish ส่วนใหญ่จะเลือกเข้าร่วมศาสนาและอยู่กับกลุ่มต่อไป การที่บุคคลเลือกที่จะออกจากกลุ่มหลังอายุ 16 ปี จะส่งผลถึงยีนพูลของกลุ่มประชากร Amish นี้อย่างไร และของกลุ่มประชากรในสหรัฐอเมริกาอย่างไร

8. เมื่อ 20 ปีที่แล้ว นกชนิดหนึ่งซึ่งพบเฉพาะในหมู่เกาะแห่งหนึ่งมีปริมาณลดลงมากเหลือเพียง 6 ตัว โดยนกเพศผู้และเพศเมียเพียง 1 คู่เท่านั้นที่สามารถสืบพันธุ์ได้ จึงมีความพยายามที่จะปกป้องสายพันธุ์นี้ไว้โดยวิธีต่าง ๆ ในปัจจุบันพบว่าประชากรของนกชนิดนี้เพิ่มเป็น 300 ตัว แต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทางพันธุกรรมนกชนิดนี้ยังคงถูกจัดว่าเป็นสปีชีส์ที่มีความเสี่ยงของการสูญพันธุ์สูงมากอยู่ จงให้เหตุผลว่าเป็นเพราะเหตุใด

9. จงเติมข้อความเกี่ยวกับการแยกเหตุการสืบพันธุ์ที่กำหนดให้ ลงในที่ว่างหน้าข้อความที่มีความสัมพันธ์กัน (ตอบซ้ำได้)

แหล่งที่อยู่ ช่วงเวลาในการผสมพันธุ์ โครงสร้างของอวัยวะสืบพันธุ์
สรีรวิทยาของเซลล์สืบพันธุ์ พฤติกรรม

_____________ 9.1) กบ *Rana sylvatica* ผสมพันธุ์ในช่วงกลางเดือนมีนาคม ขณะที่กบ *R. pipiens* ผสมพันธุ์ช่วงต้นเดือนเมษายน

_____________ 9.2) ลักษณะการวนของเปลือกหอยทาก 2 ชนิด ในสกุล *Bradybaena* มีการวนต่างทิศกัน ทำให้ช่องเปิดอวัยวะสืบพันธุ์ไม่ตรงกัน

_____________ 9.3) การที่เม่นทะเล 2 สายพันธุ์ คือ red urchin และ purple urchin ปล่อยสเปิร์มและไข่ออกไปในน้ำทะเล แต่ไม่สามารถปฏิสนธิเป็น zygote ได้ เพราะโปรตีนบนผิวของสเปิร์มและไข่ยึดติดกันไม่ได้

_____________ 9.4) งู 2 ชนิด ในสกุล *Thamnophis* อยู่ในพื้นที่เดียวกันแต่พบว่าชนิดหนึ่งอยู่ในน้ำเป็นหลัก ขณะที่อีกชนิดอยู่บนบกเป็นส่วนใหญ่

_____________ 9.5) สกั๊งค์ (skunk) 2 ชนิด ในทวีปอเมริกาเหนือ อาศัยอยู่ในเขตภูมิศาสตร์ซ้อนทับกัน แต่พบว่าชนิด *Spilogale putoris* ผสมพันธุ์ปลายฤดูหนาว ขณะที่ชนิด *S. gracilis* ผสมพันธุ์ปลายฤดูร้อน

_____________ 9.6) นก blue-footed booby เพศผู้เต้นรำเพื่อดึงดูดให้เพศเมียเข้าร่วมเต้นด้วย

10. เพราะเหตุใดสิ่งมีชีวิตบางชนิดที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก จึงไม่สามารถผสมพันธุ์กันและให้กำเนิดลูกได้

ภาคผนวก

คำศัพท์

บทที่ 4		
ก	การกลายหรือมิวเทชัน	mutation
	การเกิดนอนดิสจังชัน	nondisjunction
	การจำลองแบบกึ่งอนุรักษ์	semiconservative replication
	การตัดแต่งอาร์เอ็นเอ	RNA processing
	การถอดรหัส	transcription
	การแทนที่คู่เบส	base-pair substitution
	การแปลรหัส	translation
	การเพิ่มขึ้นหรือขาดหายของนิวคลีโอไทด์	insertion or deletion of nucleotide
	เกลียวคู่	double helix
ค	แคริโอไทป์	karyotype
	โคดอน	codon
จ	จีโนม	genome
	จุดเริ่มต้นของการจำลองตัว	origin of replication
ด	ดีเอ็นเอแม่แบบ	DNA template
ท	ทรานสเฟอร์อาร์เอ็นเอ	transfer RNA ; tRNA
	ทิศทางตรงกันข้าม	antiparallel
น	นิวคลีโอโซม	nucleosome
	นิวคลีโอไทด์	nucleotide
บ	เบสคู่สม	complementary base

พ	พลาสมิด	plasmid
	พอลิโซม หรือ พอลิไรโบโซม	polysome หรือ polyribosome
	พอลิพลอยด์	polyploid
	พิวรีน	purine
	ไพริมิดีน	pyrimidine
ฟ	เฟรมชิฟท์มิวเทชัน	frameshift mutation
ม	เมสเซนเจอร์อาร์เอ็นเอ	messenger RNA; mRNA
ย	ยีน	gene
ร	รหัสพันธุกรรม	genetic code
	รหัสเริ่มต้น	start codon
	รหัสสามเบส	triplet code
	รหัสหยุด	stop codon
	ไรโบโซมอลอาร์เอ็นเอ	ribosomal RNA ; rRNA
ล	ลีดดิงสแทรนด์	leading strand
	แลกกิงสแทรนด์	lagging strand
ส	สิ่งก่อการกลายหรือมิวทาเจน	mutagen
	สิ่งก่อมะเร็ง	carcinogen
อ	แอนติโคดอน	anticodon
ฮ	ฮอมอโลกัสโครโมโซม	homologous chromosome
	บทที่ 5	
ก	กฎการแยก	law of segregation
	กฎการรวมกลุ่มอย่างอิสระ	law of independent assortment
	การปฏิสนธิข้าม	cross-fertilization
	การปฏิสนธิตัวเอง	self-fertilization

ก	การแปรผันต่อเนื่อง	continuous variation
	การแปรผันไม่ต่อเนื่อง	discontinuous variation
	การผสมกลับ	backcross
	การผสมทดสอบ	testcross
	การผสมลักษณะเดียว	monohybrid cross
	การผสมสองลักษณะ	dihybrid cross
ค	ครอสซิงโอเวอร์	crossing over
	ความเด่นไม่สมบูรณ์	incomplete dominance
	ความเด่นร่วม	codominance
จ	จีโนไทป์	genotype
พ	พาหะ	carrier
ฟ	ฟีโนไทป์	phenotype
ม	มัลติเพิลแอลลีล	multiple alleles
ย	ยีน	gene
	ยีนที่เกี่ยวเนื่องกับเพศ	sex-linked gene
	ยีนบนโครโมโซม X	X-linked gene
	ยีนบนโครโมโซม Y	Y-linked gene
ร	รีคอมบิเนชัน	recombination
	รุ่น F_1	first filial generation
	รุ่น F_2	second filial generation
	รุ่นพ่อแม่ หรือ รุ่น P	parental generation
ล	ลักษณะ	trait
	ลักษณะควบคุมด้วยยีนหลายคู่	polygenic trait
	ลักษณะด้อย	recessive trait
	ลักษณะเด่น	dominant trait

ล	ลิงเกจ	linkage
	โลคัส	locus
ส	ส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล	extensions of Mendelian genetics
	สายพันธุ์แท้	true-breeding line หรือ pure line
อ	แอลลีล	allele
	แอลลีลด้อย	recessive allele
	แอลลีลเด่น	dominant allele
ฮ	ฮอมอไซกัส	homozygous
	ฮอมอไซกัสโดมิแนนท์	homozygous dominant
	ฮอมอไซกัสรีเซสสีฟ	homozygous recessive
	เฮเทอโรไซกัส	heterozygous
	บทที่ 6	
ก	การโคลนดีเอ็นเอ	DNA cloning
	การโคลนยีน	gene cloning
	การตรวจแก้จีโนม	genome editing
	การบำบัดด้วยยีน	gene therapy
ค	เครื่องหมายโมเลกุล	molecular marker
จ	เจลอิเล็กโทรฟอรีซิส	gel electrophoresis
ด	ดีเอ็นเอมาตรฐาน	DNA marker
	ดีเอ็นเอแม่แบบ	DNA template
	ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์	recombinant DNA
ต	ตำแหน่งตัดจำเพาะ	restriction site
บ	บริเวณจดจำ	recognition site

ป	ปลายทู่	blunt end
	ปลายเหนียว	sticky end
พ	พอลิเมอเรสเชนรีแอกชันหรือพีซีอาร์	polymerase chain reaction; PCR
	พันธุวิศวกรรม	genetic engineering
	ไพรเมอร์	primer
ล	ลายพิมพ์ดีเอ็นเอ	DNA fingerprint
ว	เวกเตอร์	vector
ส	สิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรม	genetically modified organism; GMO
อ	เอนไซม์ตัดจำเพาะ	restriction enzyme
	บทที่ 7	
ก	กฎการใช้และไม่ใช้	law of use and disuse
	กฎการถ่ายทอดลักษณะที่เกิดขึ้นใหม่	law of inheritance of acquired characteristics
	กฎฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก หรือ หลักการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก	Hardy-Weinberg law หรือ Hardy-Weinberg principle
	กายวิภาคเปรียบเทียบ	comparative anatomy
	การเกิดสปีชีส์ใหม่	speciation
	การคัดเลือกโดยธรรมชาติ	natural selection
	การถ่ายเทยีน	gene flow
	การปรับตัวเชิงวิวัฒนาการ	evolutionary adaptation
	การผสมพันธุ์ในเครือญาติ	inbreeding
	การผสมพันธุ์แบบไม่สุ่ม	nonrandom mating
	การผสมพันธุ์แบบเลือกลักษณะ	assortative mating

ก	การแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์	geological distribution
	การแยกเหตุการสืบพันธุ์	reproductive isolation
	กำเนิดสปีชีส์แบบซิมพาทริก	sympatric speciation
	กำเนิดสปีชีส์แบบแอลโลพาทริก	allopatric speciation
ค	ความถี่ของจีโนไทป์	genotype frequency
	ความถี่ของแอลลีล	allele frequency
	โครงสร้างกำเนิดเดียวกัน	homologous structure
	โครงสร้างกำเนิดต่างกัน	analogous structure
จ	เจเนติกดริฟต์แบบสุ่ม	random genetic drift
ช	ชีวภูมิศาสตร์	biogeography
	ชีววิทยาโมเลกุล	molecular biology
ซ	ซากดึกดำบรรพ์	fossil
ท	ทฤษฎีการคัดเลือกโดยธรรมชาติ	theory of natural selection
	ทฤษฎีสังเคราะห์ของวิวัฒนาการ	synthetic theory of evolution
บ	บรรพชีวินวิทยา	palaeontology
ป	ประชากร	population
	ปรากฏการณ์คอขวด	bottleneck effect
	ปรากฏการณ์ผู้ก่อตั้ง	founder effect
ม	มิวเทชัน	mutation
ย	ยีนพูล	gene pool

ว	วิทยาเอ็มบริโอ	embryology
	วิวัฒนาการ	evolution
	วิวัฒนาการจุลภาค	microevolution
	วิวัฒนาการมหภาค	macroevolution
ส	สมการของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก	Hardy-Weinberg equation
	สมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก	Hardy-Weinberg equilibrium
	สิ่งมีชีวิตคงสภาพดึกดำบรรพ์	living fossil
อ	อนุกรมวิธาน	taxonomy

บรรณานุกรม

จารุจินต์ นภีตะภัฏ, กานต์ เลขะกุล, และวัชระ สงวนสมบัติ. (2555). **คู่มือศึกษาธรรมชาติ หมอบุญส่ง เลขะกุล นกเมืองไทย.** กรุงเทพฯ : บริษัท ด่านสุทธาการพิมพ์ จำกัด.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2558). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ชีววิทยา เล่ม 4 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4–6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551** (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

สมาคมพันธุศาสตร์แห่งประเทศไทย และสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **สาระน่ารู้อณูพันธุศาสตร์ (Essential Molecular Genetics)**. กรุงเทพฯ : บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). (2558, 28 พฤศจิกายน). **คำถามที่พบบ่อยเกี่ยวกับอาหาร GM**. สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2560, จาก https://www.nstda.or.th/th/nstda-knowledge/142-knowledges/1954-gm

สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2560). **พจนานุกรมศัพท์พันธุศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสภา** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์.

สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. (2546). **ศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน** (พิมพ์ครั้งที่ 5 แก้ไขเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์.

AquaBounty. **The Result is What We Call "The AquAdvantage"**. Retrieved October 10, 2017, from http://aquabounty.com/innovation/technology/

Campbell, N. A., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Reece, J. B. (2018). **Biology: A global approach** (11th ed). New York: Pearson Education Limited.

Gostin, L. O., Altevogt, B. M., & Lenzi, R. N. (2014). **Oversight and review of clinical gene transfer protocols: assessing the role of the recombinant DNA advisory committee**. Washington, DC: National Academies Press.

Griffiths, A. J. F., Susan R. W., Sean B. C., & John D. (2012). **Introduction to genetic analysis** (10th ed). New York: W.H. Freeman and Company.

Hall, B.K. & Hallgrimsson, B. (2014). **Strickberger's evolution** (5th ed). Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning.

Hellens, R. P., C. Moreau, K. Lin-Wang, K. E. Schwinn, S. J. Thomson et al. (2010). Identification of Mendel's white flower character. **PLoS ONE**, 5 (10), 1-8.

Hoefnagels, M. (2009). **Biology: Concepts and investigations** (2nd ed). New York: McGraw Hill.

Hoelzel, A. R., Fleischer, R. C., Campagna, C., Le Boeuf, B. J. & Alvord, G. (2002). Impact of a population bottleneck on symmetry and genetic diversity in the northern elephant seal. **Journal of Evolutionary Biology**, 15 (4), 567-575.

Mayr, E. (2003). **The growth of biological thought: Diversity, evolution and inheritance** (12th ed). Cambridge, Mass: The Belknap Press of Harvard University Press.

Mendel, G. (1996). Experiments in plant hybridization (1865). [**Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn**]. Retrieved October 10, 2017, from www.esp.org

Morgan, T. H. & Lynch, C. J. (1912). The linkage of two factors in *Drosophila* that are not sex-linked, **Biological Bulletin**, 23, 174–182.

National Cancer Institute at the National Institutes of Health. **Genetic Testing for Hereditary. Cancer Syndromes**. Retrieved October 9, 2017, from https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/genetics/genetic-testing-fact-sheet

Reid, J. B., & Ross, J. J. (2011). Mendel's genes: Toward a full molecular characterization. **Genetics**, 189 (1), 3-10.

Rosenbaum, P.A. (2011). **Volpe's Understanding Evolution** (7th ed). New York: McGraw-Hill Companies, Inc.

Russell, P. J. (2014). **iGenetics : a molecular approach** (3rd ed). California: Pearson Education.

Russell, P. J., Wolfe, S. L., Hertz, P. E.,Starr, C. & McMillan, B. (2008). **Biology**: The Dynamic Science (1st ed). Canada: Thomson Brooks/Cole.

Tamarin, R. H. (2004). **Principles of genetics** (7th ed). Boston: McGraw-Hill.

University of Connecticut. **Genetics of Pollinator-mediated Speciation**. Retrieved October 9, 2017, from http://monkeyflower.uconn.edu/genetics-of-pollinator-mediated-speciation/

U.S.National Library of Medicine. (2013). **Adenosine deaminase deficiency**. Retrieved October 10, 2017, from https://ghr.nlm.nih.gov/condition/adenosine-deaminase-deficiency#inheritance

Vanavichit, A., Yoshihashi, T., Wanchana, S., Areekit, S., Saengsraku, D., Kamolsukyunyong, W. & Tragoonrung, S. (2006). Positional cloning of Os2AP, the aromatic gene controlling the biosynthetic switch of 2-acetyl-1-pyrroline and gamma aminobutyric acid (GABA) in rice. **In 5th International rice genetics symposium.** Manila, Philippines.

World Health Organization. (May 2014). **Frequently asked questions on genetically modified foods**. Retrieved October 10, 2017, from http://www.who.int/foodsafety/areas_work/food-technology/faq-genetically-modified-food/en/

ที่มาของรูป

ที่มา	รูป (หน้า)
เอื้อเฟื้อโดย ศ.ดร.ไพศาล สิทธิกรกุล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	- 4.15 (22) - 7.1 (ปะการัง ปลา ผีเสื้อ แอมโมไนต์) (166) - 7.2 (แปะก๊วย) (167) - ไทรโลไบท์ (171)
เอื้อเฟื้อโดย ผศ.ดร.เพลินพิศ โชคชัยชำนาญกิจ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	- โครโมโซมของกบนา และโครโมโซมของมนุษย์ (1) - 4.1 (4) - 5.22 (95) - 5.26 (101)
เอื้อเฟื้อโดย อ.ดร.กิตติคุณ วังกานนท์ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	- คำว่า Biology ในจานเพาะเชื้อ คือ แบคทีเรีย *Escherichia coli* ที่ได้รับยีน *GFP* ซึ่งจะเรืองแสงเมื่อได้รับช่วงแสงที่เหมาะสม และในจานเพาะเชื้อด้านข้าง คือ โคโลนีของ *E. coli* ปกติ และโคโลนีของ *E. coli* ที่ได้รับยีน *GFP* (หน้าปก) - เซลล์แบคทีเรียที่ได้รับพลาสมิด (117) - 6.6 (129) - 6.8 (130) - แบคทีเรีย B1 และ B2 (131)
เอื้อเฟื้อโดย อ.ดร.ณัฐวดี จินตโกวิท ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	- *Arabidopsis thaliana* (9)
เอื้อเฟื้อโดย นพ.วิชัย อยู่ยงวัฒนา	- ลักษณะทางพันธุกรรมที่ถ่ายทอดในครอบครัว (55)
เอื้อเฟื้อโดย นางสาววันทนี ทาทอง	- 6.9 (132)

ที่มา	รูป (หน้า)
Daderot (Own work) [Public domain], via Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AArchaeopteryx_lithographica_-_IMG_0679.jpg	- ซากดึกดำบรรพ์ของอาร์คีออพเทอริกซ์ (163)
Jules Pizzetta [Public domain], via Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AJean-baptiste_lamarck2.jpg	- 7.9 (178)
Leonard Darwin (Woodall 1884) [Public domain], via Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A1878_Darwin_photo_by_Leonard_from_Woodall_1884_-_cropped_grayed_partially_cleaned.jpg	- 7.11 (180)
London Stereoscopic & Photographic Company (active 1855-1922) (First published in Borderland Magazine, April 1896) [Public domain], via Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AAlfred-Russel-Wallace-c1895.jpg	- 7.15 (185)

คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา เล่ม 2 ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551

คณะที่ปรึกษา

1. ดร.พรพรรณ ไวทยางกูร	ผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. รศ.ดร.สัญญา มิตรเอม	รองผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2

1. รศ.ดร.ธีรพงษ์ บัวบูชา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ.ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. ศ.ดร.ไพศาล สิทธิกรกุล	ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
5. นายธีรพัฒน์ เวชชประสิทธิ์	ผู้อำนวยการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
6. รศ.ดร.วีระวรรณ สิทธิกรกุล	ผู้เชี่ยวชาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
7. นางเพ็ชรรัตน์ ศรีวิลัย	ผู้เชี่ยวชาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
8. ผศ.ดร.พัชนี สิงห์อาษา	ผู้ชำนาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

9. นายณรงค์ พ่วงศรี	ผู้ชำนาญ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
10. ดร.สุนัดดา โยมญาติ	ผู้ชำนาญสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
11. ดร.นันทยา อัครอารีย์	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
12. ดร.ขวัญชนก ศรัทธาสุข	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
13. นางสาวปุณยาพร บริเวธานันท์	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ชีววิทยา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เล่ม 2

1. อ.ดร.กิตติคุณ วังกานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. นายณัฐพงศ์ มนต์อ่อน	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) กรุงเทพมหานคร
3. นายวีระเดช คำถาวร	โรงเรียนหอวัง กรุงเทพมหานคร
4. นางถนิมาภรณ์ ตั้งตรัยรัตนกุล	โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา กรุงเทพมหานคร
5. นายสิปป์แสง สุขผล	โรงเรียนรัตนโกสินทร์สมโภช จ.นครปฐม
6. นายธีระรัตน์ อุบลรัตน์	โรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ จ.พระนครศรีอยุธยา
7. นางสาวศศิพินทุ์ นรเศรษฐพันธุ์	โรงเรียนสิรินธรราชวิทยาลัย จ.นครปฐม
8. นางสาววิรัญญา สุขมี	โรงเรียนพัทลุง จ.พัทลุง
9. นายอนุรุทธิ์ หมีดเส็น	โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จ.นครศรีธรรมราช
10. นางวรรณวิภา เบญจเลิศยานนท์	โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ ภูเก็ต จ.ภูเก็ต
11. นายสุรเดช เอ่งฉ้วน	โรงเรียนอ่าวลึกประชาสรรค์ จ.กระบี่
12. ดร.อติโรจน์ ปพัฒน์เปรมสิริ	โรงเรียนสุราษฎร์พิทยา จ.สุราษฎร์ธานี
13. นายนราธิป ประสมบูรณ์	โรงเรียนนารีนุกูล จ.อุบลราชธานี
14. นางราชี สืบโมรา	โรงเรียนพยัคฆภูมิวิทยาคาร จ.มหาสารคาม

15. นางสาวเยาวเรช หมู่ดี	โรงเรียนประสาทวิทยาคาร จ.สุรินทร์
16. นายกฤษฎา โสมดำ	โรงเรียนปทุมเทพ จ.หนองคาย
17. นายฉัตรชัย ชัยนนถี	โรงเรียนสูงเม่นชนูปถัมภ์ จ.แพร่
18. นางสาวอังคนางค์ เชื้อเจ็ดตน	โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จ.เชียงราย
19. นางจุรีภรณ์ ไชยเหล็ก	โรงเรียนแม่ใจวิทยาคม จ.พะเยา
20. นายอุดร ปงกาวงค์	โรงเรียนฝางชนูปถัมภ์ จ.เชียงใหม่
21. นายทวีศักดิ์ เปี่ยมทัพ	โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จ.พิษณุโลก
22. นายกิตติศักดิ์ ปราบพาล	โรงเรียนมาบตาพุดพันพิทยาคาร จ.ระยอง
23. นายมณเฑียร ส่งเสริม	โรงเรียนชลราษฎรอำรุง จ.ชลบุรี
24. ดร.ปารวีร์ เล็กประเสริฐ	นักวิชาการอาวุโสสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
25. นางสาววิลาส รัตนานุกูล	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
26. ดร.ภัณฑิลา อุดร	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
27. นางสาวปาณิก เวียงชัย	นักวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะบรรณาธิการ

1. รศ.ดร.ธีรพงษ์ บัวบูชา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ.ดร.อาจอง ประทัตสุนทรสาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ผศ.ดร.รัชนีกร ธรรมโชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
5. ศ.ดร.ไพศาล สิทธิกรกุล	ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
6. นายธีรพัฒน์ เวชชประสิทธิ์	ผู้อำนวยการสาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



พิมพ์ที่โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว นายพินิจศักดิ์ สุวรรณรังค์ ผู้พิมพ์และผู้โฆษณา พ.ศ. 2561

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ชีววิทยา เล่ม ๒ **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)**

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ **เวลา ๖๐ ชั่วโมง จำนวน ๑.๕ หน่วยกิต**

ศึกษาเกี่ยวกับโครโมโซม และสารพันธุกรรม โครงสร้างของ DNA การจำลอง DNA การควบคุมลักษณะทางพันธุกรรมของ DNA มิวเทชัน และการเกิดมิวเทชัน ศึกษาการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม การศึกษาพันธุกรรมของเมนเดล การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม ลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล การถ่ายทอดยีนบนโครโมโซมเพศ ยีนบนโครโมโซมเดียวกัน ศึกษาเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอ พันธุวิศวกรรมและการโคลนยีน การหาขนาดของ DNA และการหาลำดับนิวคลีโอไทด์ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางดีเอ็นเอและเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอกับความปลอดภัยทางชีวภาพและชีวจริยธรรม ศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการ หลักฐานและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต แนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต พันธุศาสตร์ประชากร ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีล และกำเนิดสปีชีส์ โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะการเรียนรู้แห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา ด้านการสื่อสาร สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. สืบค้นข้อมูล อธิบายสมบัติและหน้าที่ของสารพันธุกรรม โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ DNA และสรุปการจำลองDNA
๒. อธิบายและระบุขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและหน้าที่ของ DNA และ RNA แต่ละชนิดในกระบวนการสังเคราะห์ โปรตีน
๓. สืบค้นข้อมูล และอธิบายการเกิดมิวเทชันระดับยีนและระดับโครโมโซม สาเหตุการเกิดมิวเทชัน รวมทั้งยกตัวอย่างโรคและกลุ่มอาการที่เป็นผลของการเกิดมิวเทชัน
๔. สืบค้นข้อมูล อธิบายและสรุปผลการทดลองของเมนเดล
๕. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสารพันธุกรรม แอลลีล โปรตีน ลักษณะทางพันธุกรรม และเชื่อมโยงกับความรู้เรื่องพันธุศาสตร์เมนเดล
๖. อธิบายและสรุปกฎแห่งการแยกและกฎแห่งการรวมกลุ่มอย่างอิสระ และนำกฎของเมนเดลนี้ไปอธิบายการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมและใช้ในการคำนวณโอกาสใน การเกิดฟีโนไทป์และจีโนไทป์แบบต่างๆ ของรุ่น F_1 และ F_2
๗. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ อธิบาย และสรุปเกี่ยวกับการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เป็นส่วนขยายของพันธุศาสตร์เมนเดล
๘. สืบค้นข้อมูล วิเคราะห์ และเปรียบเทียบลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันไม่ต่อเนื่องและลักษณะทางพันธุกรรมที่มีการแปรผันต่อเนื่อง
๙. อธิบายการถ่ายทอดยีนบนโครโมโซม และยกตัวอย่างลักษณะทางพันธุกรรมที่ถูกควบคุมด้วยยีนบนออโตโซมและยีนบนโครโมโซมเพศ
๑๐. อธิบายหลักการสร้างสิ่งมีชีวิตดัดแปรพันธุกรรมโดยใช้ดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์
๑๑. สืบค้นข้อมูล ยกตัวอย่าง และอภิปรายการนำเทคโนโลยีทางดีเอ็นเอไปประยุกต์ใช้ทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม นิติวิทยาศาสตร์ การแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม และข้อควรคำนึงถึงด้านชีวจริยธรรม
๑๒. สืบค้นข้อมูลและอธิบายเกี่ยวกับหลักฐานที่สนับสนุนและข้อมูลที่ใช้อธิบายการเกิดวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต
๑๓. อธิบายและเปรียบเทียบแนวคิดเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของฌอง ลามาร์ก และทฤษฎีเกี่ยวกับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตของชาลส์ ดาร์วิน
๑๔. ระบุสาระสำคัญและอธิบายเงื่อนไขของภาวะสมดุลของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแอลลีลในประชากร พร้อมทั้งคำนวณหาความถี่ของแอลลีลและจีโนไทป์ของประชากรโดยใช้หลักของฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก
๑๕. สืบค้นข้อมูล อภิปราย และอธิบายกระบวนการเกิดสปีชีส์ใหม่ของสิ่งมีชีวิต

รวมทั้งหมด ๑๕ ผลการเรียนรู้



สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ



9 786163 627001

ราคา 92.00 บาท

ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
พิมพ์ที่โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว
นายพินิจศักดิ์ สุวรรณรังค์ ผู้พิมพ์และผู้โฆษณา
๖๑๐๐๑๓๘





www.suksapan.or.th